

Methode voor economische optimalisatie van geothermische verwarmings- en koelsystemen

Wouter Marcel Christiane Peere

Thesis voorgedragen tot het behalen
van de graad van Master of Science
in de ingenieurswetenschappen:
werktuigkunde

Promotoren:

Prof. dr. ir. L. Helsen
Prof. ir. W. Boydens

Assessoren:

Prof. dr. ir. J. Duflou
dr. ir. K. Six

Begeleiders:

dr. ir. D. Picard
ir. I. Cupeiro

© Copyright KU Leuven

Zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van zowel de promotoren als de auteur is overnemen, kopiëren, gebruiken of realiseren van deze uitgave of gedeelten ervan verboden. Voor aanvragen tot of informatie i.v.m. het overnemen en/of gebruik en/of realisatie van gedeelten uit deze publicatie, wend u tot Faculteit Ingenieurswetenschappen, Kasteelpark Arenberg 1 bus 2200, B-3001 Heverlee, +32-16-321350.

Voorafgaande schriftelijke toestemming van de promotoren is eveneens vereist voor het aanwenden van de in deze masterproef beschreven (originele) methoden, producten, schakelingen en programma's voor industrieel of commercieel nut en voor de inzending van deze publicatie ter deelname aan wetenschappelijke prijzen of wedstrijden.

7 augustus 1420 - Firenze, Italië

Het is nog vroeg als Filippo Brunelleschi zijn werkplaats verlaat en zich naar het Piazza del Duomo begeeft. "Al generaties lang werken ze hier aan de Santa Maria del Fiore, een kathedraal met een grootte zo ongezien dat ze enkel door het meest vernuftige volk ter wereld kan worden gemaakt," dacht hij die ochtend, "maar niemand weet hoe." Wanneer hij de mensen passeert, wordt er gefluisterd. Mensen keren hem de rug toe en anderen komen hem begroeten. Met gemengde gevoelens kijkt men toe hoe hij, behendig voor zijn leeftijd, naar de rand van de koepel klimt.

Twee jaar geleden hing er op diezelfde plaats een oproep uit. Eenieder mocht een voorstel doen voor de bouw van de koepel, zolang het initiële spitsvormige model maar werd gevolgd. Timmerlieden van over de hele gekende wereld kwamen afgezakt naar de stad om een maquette te maken, maar slechts één ervan sprong echt in het oog: die van de goudsmid en klokkenbouwer Brunelleschi. Met groot retorisch talent wist hij vervolgens de jury ervan te overtuigen dat hij de leiding moest krijgen van de bouw. Hoewel niemand echt wist hoe hij het ging doen, kreeg hij de kans zich te bewijzen. Het is 7 augustus 1420 en de eerste steen wordt gelegd aan een koepel die zelfs 600 jaar later zijn gelijke op deze wereld niet zal kennen.

Toen ik een paar jaar geleden voor de eerste keer de Duomo in Firenze zag, werd ik gegrepen door verwondering. Ofschoon ik veel had gelezen over het bouwwerk, stond ik versteld bij de aanblik ervan. Dat Brunelleschi tijdens het bouwproces nieuwe metselmethodes, kranen, tandwielcombinaties, aandrijvingen en meettoestellen had moeten bedenken om met alle uitdagingen om te kunnen gaan, maakte hem mijn voorbeeldfiguur als ingenieur -iemand die volhardt in het keer op keer vinden van oplossingen. Een opmerkelijke keuze want hij was tenslotte goudsmid van beroep.

Brunelleschi groeide op in de schaduw van dit bouwwerk, omgeven door werklieden en primitieve machines, die met zekerheid een invloed moeten hebben gehad op de jonge goudsmid. Opgegroeid met het probleem van de koepel en de groeiende bezorgdheid van de bevolking, trok hij op een dag zuidwaarts om te leren van de bouwwijze van de Romeinen, de gewelven, het pantheon, het colosseum ... Voor mijn opleiding tot ingenieur trok ik naar de KU Leuven en moest onze alma mater toen al bestaan hebben, weet ik dat Filippo Leuven ook zeker overwogen zou hebben.

Zoals ook Brunelleschi veel heeft moeten leren, zo ook kwam ik relatief onwetend in Arenberg aan, met de droom om ingenieur te worden. Ik geloof niet dat Filippo echt beseftte aan welk werk hij begon, net zoals je dat als achttienjarige aan een universiteit ook niet echt kan weten, maar gaandeweg vond ik mijn weg doorheen het eerste jaar naar het tweede toe en al iets minder pistachegroen achter de oren, koos ik toen voor de werktuigkunde.

Toen de koepel een helling begon te krijgen van 30° begon de echte uitdaging. Vanaf nu konden de stenen door de zwaartekracht naar binnen beginnen zakken en de hele constructie in het gevaar brengen. Ik ben blij dat ik, in tegenstelling tot

Filippo, Damien en Iago rondom mij had die mij ondersteunden opdat dit niet zou gebeuren bij mijn thesis. Zonder deze twee mensen had deze spitsboog van een tekst, waarschijnlijk ergens tussen een ruïne en een bouwvallige kerk gestaan. Dankzij vele discussies - de ene al zwaarder dan de andere -, de vele inzichten en kritische opmerkingen die ze gaven, kon ik dit werk voortzetten. Mijn dank en appreciatie zijn de uwe.

In Firenze viel de Duomo onder de verantwoordelijkheid van de wolgilde, die Brunelleschi in 1420 de finale goedkeuring en het vertrouwen gaf te mogen beginnen. Ook ik heb, weliswaar iets recenter, het vertrouwen gekregen van prof. Helsen toen ik met de vraag voor een eigen thesisonderwerp kwam. Met de bevestiging van prof. Boydens dat hij co-promotor wou zijn, kon ik aan het bouwwerk beginnen. Ik ben deze twee mensen van harte dankbaar voor het vertrouwen dat ze initieel in mij stelden, dat ze in me behielden en alle kansen die ik van hen kreeg en krijg.

Filippo had vele critici en zo ook ben ik ervan overtuigd dat mijn assessoren prof. Dufflou alsook dr. Six deze tekst nauwkeurig en kritisch zullen nalezen. Ik wil hen alvast bedanken voor hun tijd en interesse in dit bouwwerk en ik kijk ernaar uit om hen op de presentatie, net zoals Filippo, te kunnen overtuigen van mijn kunnen.

Maar misschien wel de belangrijkste groep is de menigte rondom Filippo, die hoewel oprecht bezorgd, toch vertrouwden dat hij het project ging klaar krijgen. Ik wil dan ook mijn beide ouders bedanken alsook mijn grootouders die mij van kinds af hebben gevolgd en gesteund. Ze liggen aan de bakermat van mijn brede interesse gaande van de oudheid tot machines en uiteindelijk deze materie. Gedurende het gehele traject bleven ze interesse tonen en bleven ze me steunen. Zonder hen was er simpelweg geen Wouter Peere zoals die hier vandaag deze tekst schrijft. Mijn eeuwige dank -voor alles van genen tot ervaring- gaat dan ook naar mijn familie uit.

In de laatste bouwfase van dit project overleed op 19 maart een van mijn grote supporters, mijn grootvader en peter, Marcel Peere. Net zoals de anderen heeft hij mij tijdens mijn opleiding altijd gesteund en was hij immer geïnteresseerd in 'hoe de studies gaan'- los van alles wat hij in zijn leven meemaakte. Toen ik nog maar pas begonnen was aan de universiteit stelde hij mij dat hij in zijn leven nog één ding wou meemaken voor hij stierf: mijn proclamatie.

Brunelleschi zag nooit het resultaat van zijn werk. Het lot en de gezondheid van mijn grootvader hebben daar evenzeer zo over beslist. Graag wil ik het vele en harde werken tijdens al die jaren dat uiteindelijk leidde tot deze spitskoepel, opdragen aan hem.

Ik hoop dat ik alle mensen die in mij geloofden toen ik me misschien zelf in twijfel trok, trots heb kunnen maken met deze prestatie. Tenslotte ben ik nu dan misschien wel ingenieur, maar met goud kan ik echt niet overweg.

In dankbare herinnering aan mijn
grootvader en peter Marcel Peere

Inhoudsopgave

Inhoudsopgave	iii
Samenvatting	vi
Lijst van figuren	vii
Lijst van tabellen	ix
Lijst van afkortingen en symbolen	xi
1 Inleiding	1
I Voorstudie	3
2 Gebruikte concepten	5
2.1 Gebruikte technologieën	5
2.1.1 Boorveld	5
2.1.2 Passief koelen met behulp van het boorveld	5
2.1.3 Actief koelen met behulp van het boorveld	6
2.1.4 Airco/compressiekoelmachine	6
2.1.5 Grondwarmtepomp	6
2.1.6 Gascondensatieketel	7
2.1.7 Lucht-waterwarmtepomp	7
2.1.8 Zonnecollector	7
2.1.9 Droge koeler	7
2.2 Validatiemethodes	8
2.2.1 Earth Energy Designer (EED)	8
2.2.2 Modelica - IDEAS	8
3 Uitdagingen	9
3.1 Hybride systemen	9
3.2 Veldbalancering	9
3.3 Duale energiestromen	10
4 Casestudies	13
4.1 Algemene assumpties	13
4.2 Koelvraaggedomineerd gebouw	15
4.2.1 Werkwijze	15
4.2.2 Conclusies en discussie	17

4.3	Warmtevraaggedomineerd gebouw	18
4.3.1	Werkwijze	18
4.3.2	Conclusie en discussie	20
5	Dimensionering van het boorveld	21
5.1	Thermische responsie van een boorveld	21
5.1.1	Grondresponsie	21
5.1.2	Fluïdumtemperatuur	23
	Van boorwandtemperatuur naar fluïdumtemperatuur	23
	Temporele superpositie	24
5.2	Beschikbare dimensioneringsalgoritmen	25
6	Conclusie voorstudie: methodologie	28
II Ontwikkelen van de optimalisatiemethode		
		30
7	Opstellen en valideren van het dimensioneringsalgoritme	32
7.1	Samengestelde dimensionering	33
7.1.1	Laatste werkingsjaar	34
7.1.2	Eerste werkingsjaar	35
7.1.3	Combinatie van eerste en laatste werkingsjaar	37
7.2	Nauwkeurige dimensionering	37
7.3	Validatie	40
8	Boorveldreductie	43
8.1	Reductieregels	44
8.1.1	Noodzaak van reductieregels	44
8.1.2	De vier reductieregels	45
	Regel 1: het nettopiekvermogen en de basisbelasting moeten groter of gelijk zijn aan nul	46
	Regel 2: reductie stopt bij een nieuwe limiterende maand	46
	Regel 3: er mag niet rechtstreeks van onbalans veranderd worden	47
	Regel 4: er mag niet rechtstreeks van limitatie veranderd worden	48
8.2	Reductieopties	49
8.2.1	Verschillende opties	49
8.2.2	Zuivere limitatie	50
	Piekreductie	51
	Interne referentie	51
	Externe referentie	51
	Basisreductie	54
	Limitatie in eerste jaar	55
	Limitatie in laatste jaar.	57
	Reduceren tot een referentiemaand	58
	Reduceren tot een gebalanceerd veld	62
	Piek-basisreductie	64
8.2.3	Gemengde limitatie	67

8.3	Regeneratie	70
8.3.1	Veldlimitatie in het eerste jaar	72
	Stijging van onbalans	72
	Fase 1: geen extra kost noch besparing	73
	Fase 2: extra kost	73
	Daling van onbalans	74
8.3.2	Veldlimitatie in het laatste jaar	74
	Reductie tot aan gebalanceerde toestand	75
	Reductie tot aan HC	75
8.4	Samenvatting boorveldreductie	76
9	Lineaire programmering	77
9.1	Plaats in algoritme	77
9.1.1	Set van permutaties van technologieën	78
9.2	Opstellen lineair programma	79
9.2.1	Enkele noodzakelijke maatregelen	80
9.2.2	Extra piekvermogenreductie	82
9.2.3	Extra reductie basisbelasting	82
	Berekening van <i>EBB</i> en <i>EBK</i>	83
9.2.4	Regeneratie	85
	Berekening van <i>EBB</i> en <i>EBK</i>	85
	Theoretische uitwerking	87
	Discretisatie en <i>Big M</i>	89
	Uiteindelijke implementatie	90
	Regeneratiereductie	91
9.2.5	Alloceren van de belasting	91
III	Resultaten en conclusies	93
10	Resultaten	95
10.1	Gebruikte technologieën en algemene assumpties	95
10.2	Resultaten koelvraaggedomineerde case	97
10.2.1	Zonder regeneratie	100
10.2.2	Met regeneratie	103
10.3	Resultaten warmtevraaggedomineerde case	106
10.3.1	Zonder regeneratie	107
10.3.2	Met regeneratie	110
10.4	Actief koelen	113
11	Verder onderzoek	117
12	Conclusie	120
	Bibliografie	122

Samenvatting

Er bestaan veel verschillende koel- en verwarmingstechnologieën, met ieder zijn voor- en nadelen. Door verschillende technologieën te combineren, kan er relatief eenvoudig een economisch optimale oplossing gevonden worden. Indien echter rekening wordt gehouden met de opslag van energie over de seizoenen heen door gebruik te maken van boorvelden, wordt deze optimalisatie een stuk minder triviaal. Dit komt omdat het boorveld een significant aandeel in de totale kostprijs heeft en dat deze kost sterk afhankelijk is van de warmte- en koelvraag. In deze thesis is onderzocht wat het effect van thermische piek- en maandbelastingen op de kostprijs van het boorveld is. Het blijkt dat een reductie in piekvermogen altijd voordelig is voor de grootte van het veld en dat een reductie in maandbelasting soms voordelig, soms nadelig en soms geen van beide is. Op basis van deze inzichten is dan een methode en algoritme ontwikkeld om tot een economische optimale combinatie van technologieën te komen die naast en samen met het boorveld worden gebruikt.

Het blijkt dat verwarmings- en koelsystemen met een boorveld economisch voordeliger zijn dan systemen zonder boorveld, maar hoeveel voordeliger hangt van enkele factoren af, waaronder welke technologieën er gebruikt worden, de kostprijs van deze technologieën, hun belastingsprofiel, etc. Evenzeer blijkt er een andere verdeling van kosten te zijn als regeneratie wordt meegenomen of niet. In het eerste geval ligt het grootste aandeel van de totale kostprijs bij de investeringskost van de installatie, in het laatste geval bij de werkingskost. Er is ook gebleken dat boorvelden die enkel gebruik maken van actief koelen geen economisch voordeel bieden ten opzichte van situaties zonder boorveld.

Verder zijn er in dit onderzoek enkele parameters naar boven gekomen die in de toekomst kunnen worden geïmplementeerd in de structuur van het beschreven algoritme. Zo is het mogelijk de beschreven methode uit te breiden om CO₂-reductie, actief en passief koelen alsook verdere economische factoren als return on investment en de tijdswaarde van geld in rekening te brengen.

Lijst van figuren

2.1	Een grafisch-schematische weergave van een boorveld	6
3.1	Grafische illustratie van de verschillende strategieën voor de veldbalancering.	11
3.2	Voorbeeld van het probleem van duale energiestromen.	12
4.1	Effect van de reductie in piekbelasting en basisbelasting op de totale kostprijs van de installatie voor een koelvraaggedomineerd geval.	16
4.2	Effect van de reductie in piekbelasting en basisbelasting op de totale kostprijs van de installatie voor een warmtevraaggedomineerd geval.	19
4.3	Temperatuurverloop in het warmtevraaggedomineerde geval na vermindering van $150kW$ aan piekvermogen.	19
5.1	Voorbeeld van een g-functie voor verschillende verhoudingen van de boorgatspatiëring tot de boorgatdiepte.	22
5.2	Grafische weergave van hoe ruimtelijke superpositie wordt gebruikt om de temperatuur op elk boorgatsegment te berekenen.	23
5.3	Thermische weerstanden voor het geval van een enkele U-buis.	24
5.4	Grafische voorstelling van de temporele superpositie.	25
7.1	Voorbeeld van een belastingsprofiel van het boorveld.	32
7.2	Grafische weergave van het temperatuursverloop in de ondergrond voor zowel een limitatie in het eerste jaar als het laatste jaar. De basisverwarming en -koeling slaat op de temperatuur die bekomen wordt door de basisbelasting aan te leggen.	33
7.3	De vier mogelijk kwadranten waarin een boorveld zich kan bevinden.	33
7.4	Grafische weergave van de pulsen voor de methode van Bernier	34
7.5	Grafische weergave van de bepaling van de thermische weerstanden.	35
7.6	Grafische weergave van de dimensionering voor het eerste werkingsjaar	36
7.7	Schematische weergave van de dimensionering op basis van Bernier en Monzo voor verwarming/koeling.	38
7.8	Voorbeeld waarin het algoritme het verkeerde resultaat zou aangeven.	39
7.9	Validatie van de verschillende boorvelddieptes voor verschillende piekvermogens en basisbelasting voor het koelvraaggedomineerde geval.	41
7.10	Validatie van de verschillende boorvelddieptes voor verschillende piekvermogens en basisbelasting voor het warmtevraaggedomineerde geval.	41

8.1	Grafisch bewijs voor de noodzaak van de reductieregels.	46
8.2	Illustratie van de noodzaak voor regel 2.	47
8.3	Illustratie van de noodzaak voor regel 3.	48
8.4	Illustratie van de noodzaak voor regel 4.	49
8.5	Flowchart voor de implementatie van de piekreductie.	52
8.6	Verschillende referenties voor piekreductie.	53
8.7	Illustratie van de controle van regel 4 voor een reductie in piekvermogen.	54
8.8	Illustratie van de herberekening van de piekreductie.	54
8.9	Flowchart van de werking van een reductie in basisbelasting.	56
8.10	Illustratie van de bepaling van de referentiemaanden bij een reductie in basisbelasting.	57
8.11	Het verschil tussen een basisreductie met en zonder het behoud van piek.	58
8.12	Grafische weergave van de berekening van de basisreductie.	59
8.13	Flowchart voor het berekenen van de coëfficiënten.	60
8.14	Illustratie van de controle van regel 4 voor een reductie in basisbelasting.	63
8.15	Illustratie van de herberekening van de basisbelastingreductie.	63
8.16	Voorbeeld van een gemengde piek-basislimitatie.	64
8.17	Flowchart voor de piek-basisreductie.	65
8.18	Illustratie van de berekening van de piek-basisreductie.	66
8.19	Voorbeeld van een temperatuursverloop in een gemengde limitatie.	68
8.20	Flowchart van de veldreductie in het geval van een gemengde limitatie.	69
8.21	Illustratie van het verloop van een reductie in een veld dat een gemengde limitatie heeft.	71
8.22	Voorbeeld van een veld dat in het eerste jaar is gelimiteerd.	73
8.23	Voorbeeld van een veld dat in het laatste jaar is gelimiteerd.	75
9.1	Schematische weergave van de werking van de complete optimalisatie.	78
9.2	Illustratie bij de theoretische bepaling van de extra boorveldkost en -besparing.	87
9.3	Illustratie voor een discretisatie van het regeneratie-reductievlak.	89
10.1	Grafische representatie van de warmte- en koelvraag (koelvraaggedomineerde case).	99
10.2	De totale kostprijs voor elke combinatie van technologieën (koelvraaggedomineerde case).	101
10.3	De meest economische verdeling van de vermogens bij een koelvraaggedomineerd veld zonder regeneratie.	101
10.4	Gestapelde kostcurve van het ideaal geval in een koelvraaggedomineerd geval.	102
10.5	Temperatuursverloop in het boorveld (koelvraaggedomineerd).	103
10.6	Meest economische verdeling van de vermogens bij een koelvraaggedomineerd veld met regeneratie.	104
10.7	Gestapelde kostcurve van het ideaal geval bij regeneratie in een koelvraaggedomineerde case.	106

10.8 Grafische representatie van de koel- en warmtevraag (warmtevraaggedomineerde case).	107
10.9 De totale kostprijs voor elke combinatie van technologieën (warmtevraaggedomineerd).	108
10.10 De meest economische verdeling van de vermogens bij een warmtevraaggedomineerd veld zonder regeneratie.	109
10.11 Temperatuursverloop in het boorveld (warmtevraaggedomineerd).	109
10.12 Gestapelde kostcurve van het ideaal geval in een warmtevraaggedomineerd geval.	110
10.13 De meest economische verdeling van de vermogens bij een warmtevraaggedomineerd veld met regeneratie.	112
10.14 Gestapelde kostcurve van het ideaal geval (met regeneratie) in een warmtevraaggedomineerd geval.	112
10.15 Temperatuursverloop in het boorveld voor actief koelen.	114
10.16 De meest economische verdeling van de vermogens bij een koelvraaggedomineerd veld (actief koelen).	114
10.17 Gestapelde kostcurve van het ideaal geval (koelvraaggedomineerd en actief koelen).	115
10.18 De meest economische verdeling van de vermogens bij een warmtevraaggedomineerd veld (actief koelen).	115
10.19 Gestapelde kostcurve van het ideaal geval (warmtevraaggedomineerd en actief koelen).	116

Lijst van tabellen

3.1	Richtwaarden bij het probleem van duale energiestromen.	11
4.1	Kostenfuncties voor de verschillende technologieën.	14
4.2	Parameters met betrekking tot de dimensionering van het boorveld. . .	14
4.3	Gebruikte belasting voor de koelvraaggedomineerde casestudie.	15
4.4	Gebruikte belasting voor de warmtevraaggedomineerde casestudie. . . .	18
7.1	Waarden van de temperaturen bekomen met een dynamische simulatie in Modelica.	42
8.1	Verschillende reductieopties en hun effect bij bepaalde toestanden. . . .	50
10.1	Kostenfuncties voor de verschillende gebruikte technologieën.	96
10.2	Parameters met betrekking tot de dimensionering van het boorveld. . . .	96
10.3	meteologische data voor België.	98
10.4	Alle combinaties van technologieën.	98
10.5	Gebruikte belasting voor de koelvraaggedomineerde casestudie voor het boorveld.	99
10.6	Gebruikte belasting voor de warmtevraaggedomineerde casestudie voor het boorveld.	106

Lijst van afkortingen en symbolen

Afkortingen

CBC	<i>Coin-or branch and cut</i> -methode
CC	Koelvraaggedomineerd en koelvraaggelimiteerd
CH	Koelvraaggedomineerd en warmtevraaggelimiteerd
EED	Earth Energy Designer
GSHP	Grondwarmtepomp (<i>Ground Source Heat Pump</i>)
HC	Warmtevraaggedomineerd en koelvraaggelimiteerd
HH	Warmtevraaggedomineerd en warmtevraaggelimiteerd
IK	Investeringskost
MIK	Marginaleinvesteringskost
MILP	<i>Mixed Integer Linear Programming</i>
PK	Passief koelen
WK	Werkingskost

Symbolen

g	De g-functie (genormaliseerde boorwandtemperatuur) [/]
H	Boorgatdiepte [m]
k_s	Thermische conductiviteit van de bodem [W/mK]
L	Totale boorveldlengte [m]
q_h	Het piekvermogen van de thermische belasting per meter [W/m]
q_i	Warmteflux per meter in interval i [W/m]
q_m	De gemiddelde maandbelasting per meter [W/m]
q_y	De jaarlijkse onbalans in een gemiddeld jaarlijks vermogen per meter [W/m]
$Q(t)$	Thermisch vermogen op tijdstip t [W]
Q_i	Thermische puls op moment i [W]
r_b	Diameter van het boorgat [m]
R_b^*	De equivalente/effectieve boorgatweerstand [mK/W]
$R_{h,g}$	De thermische grondweerstand voor het piekvermogen berekend met de g-functies [mK/W]
R_i	De thermische grondweerstand op moment i [mK/W]
$R_{m,g}$	De thermische grondweerstand voor het gemiddeld maandvermogen berekend met de g-functies [mK/W]
$R_{y,g}$	De thermische grondweerstand voor een periode van 20 jaar berekend met de g-functies [mK/W]
t	Tijd [s]
t_s	Dimensieloze tijd [/]
t_y	Lengte van een jaar [s]
t_m	Lengte van een maand [s]
t_h	Lengte van de piek [s]
T_b	Boorwandtemperatuur [°C]
T_f	Fluïdumtemperatuur [°C]
T_g	Grondtemperatuur op oneindig [°C]
T_m	De gemiddelde fluïdumtemperatuur [°C]

Hoofdstuk 1

Inleiding

Mensen verlangen naar warmte. En soms verlangen ze weer naar verkoeling. Om op deze verlangens in te spelen, hebben ingenieurs sinds lange tijd technologieën ontwikkeld om ons te verwarmen en te verkoelen. Nu de mens het gewenst comfort heeft, verlangt deze ernaar er zo min mogelijk voor te betalen en als het even kan dat deze nog duurzaam zijn ook. Dit alles maakt dat er een veelheid aan technologieën is gekomen om op de verwarmings- en koelvraag in te kunnen spelen.

Een van die technologieën die een centrale plaats in deze tekst krijgt, is het boorveld. In principe niets meer dan een warmtewisselaar voor de ondergrond, geeft deze technologie de systeemontwerper heel veel mogelijkheden en tegelijkertijd kopzorgen. Een boorveld kan de energie die tijdens het koelen normaal verloren gaat, opslaan in de bodem en in de winter deze energie gebruiken om weer te verwarmen. Het is een duurzaam gegeven.

Echter is het aanleggen van zo een veld een kostelijke investering. De wens is dan ook het veld zo klein mogelijk te houden. Dit vraagt een goede samenwerking met andere technologieën. Al deze technologieën samen vormen een hybride systeem voor verwarming en koeling. De juiste technologieën kiezen en ze op het juiste moment gebruiken, is dan ook een uitdagende opdracht. Het is eveneens de opdracht in deze thesis.

Er worden in deze tekst drie centrale vragen gesteld. Een vraag voor elk van de drie delen. Respectievelijk zijn dat de delen: Voorstudie, Methode en Resultaten.

- **Voorstudie** Waarom is het vinden van een geschikt hybride systeem een uitdaging?
- **Methode** Hoe kan op een inzichtelijke wijze een methode ontwikkeld worden om zo een hybride systeem te vinden?
- **Resultaten** Zijn er leerrijke resultaten die getrokken kunnen worden uit deze methode indien ze wordt toegepast op enkele gevallen?

In deze tekst is getracht om de gebruikte formules en concepten grafisch te illustreren en te onderbouwen. Op die manier kan de lezer die misschien niet 100% vertrouwd is met het onderzoeksdomein de redenering toch te allen tijd volgen.

Na het lezen van deze verhandeling zal de lezer zich dan ook vertrouwd weten met de materie van hybride verwarmingsinstallaties. Hij gaat de problematiek begrijpen, alsook inzicht hebben gekregen in welke aspecten van belang zijn. Daarnaast gaat de lezer een groot inzicht verwerven in het boorveld, de centrale component in het hybride systeem.

Er valt dus veel te onderzoeken en te ontdekken, maar eerst ...

Let's start at the very beginning
A very good place to start

Julie Andrews, Sound of Music

Deel I

Voorstudie

Voorstudie

"I'm an infant with Shakespeare; I'm kind of learning how to walk. I am trying to decipher the code, you know? I do my research. And I get a clear understanding of what the language is. It is a tremendous process I have to go through as I am sure all actors do, finding the gems hidden in his language."

— Ruben Santiago-Hudson, Acteur

Zoals een acteur zich ten gronde moet inwerken in het taalgebruik en de nuances van de schrijver van zijn stuk, zo ook begint deze thesis met een voorstudie van het onderzochte onderzoeksdomein. Hoofdstuk 2 handelt over de gebruikte concepten in deze thesis. Eens het jargon gekend is, gaat Hoofdstuk 3 drie algemene uitdagingen kwalitatief beschrijven die relevant zijn in de wereld van hybride koel- en verwarmingsinstallaties die gebruik maken van een boorveld. Hoofdstuk 4 beschrijft enkele preliminaire verkenningen van de materie door middel van enkele casestudies. Deze scheppen een kwantitatief inzicht in de problematiek en zullen aanleiding geven tot de ontwikkeling van een optimalisatiealgoritme. Hoofdstuk 5 behandelt een basis aan theoretische achtergrond die nodig is om in latere hoofdstukken de redenering te kunnen volgen. Dit deel wordt tenslotte afgesloten in Hoofdstuk 6 met een methodologische bespreking voor het vervolg van de thesis.

Dit deel zal dus een antwoord geven op de vraag: *Waarom is het vinden van een geschikt hybride verwarmings- en koelsysteem een uitdaging?*

Hoofdstuk 2

Gebruikte concepten

In dit hoofdstuk staan enkele concepten die veelvoorkomend zijn in deze thesis uitgelegd. In Sectie 2.1 staan de verschillende technologieën die in de latere optimalisatie aan bod gaan komen kort toegelicht. Sectie 2.2 beschrijft de verschillende validatiemethodes die in deze thesis gebruikt worden samen met de bijhorende nauwkeurigheid.

2.1 Gebruikte technologieën

In deze thesis wordt onderzocht met welke combinatie van technologieën een economische verwarmings- en koelinstallatie kan bekomen worden. In deze sectie staan de gebruikte technologieën kort beschreven.

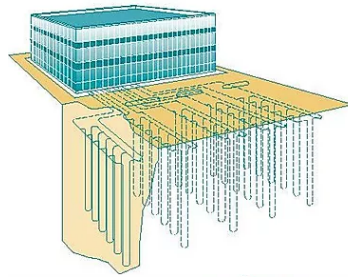
2.1.1 Boorveld

Een boorveld kan beschouwd worden als een warmtewisselaar die energie uitwisselt met de ondergrond (zie Figuur 2.1). Omdat de temperatuur in de bodem vanaf een 15 meter diepte (uiteraard een functie van de conductiviteit van de ondergrond) geen seizoensinvloed meer ondervindt¹, kan deze technologie aangewend worden om aan seizoensopslag van energie te doen [1]. Dit impliceert dat de ondergrond als een buffer van energie gebruikt wordt waarbij in de zomer, wanneer er warmte op overschot is, deze in de grond geïnjecteerd wordt om in de winter te kunnen gebruiken voor goedkope verwarming. Hetzelfde geldt voor koude die in de winter in de grond kan worden gestoken om goedkoop te koelen in de zomer [2].

2.1.2 Passief koelen met behulp van het boorveld

Indien de temperatuur van de ondergrond onder een bepaalde maximumgrens ligt, kan het boorveld gebruikt worden als koudebron voor passief koelen. Hierbij wordt simpelweg een fluidum door de koude ondergrond gestuurd ter afkoeling, waarna deze

¹Dit impliceert dat de temperatuur in de bodem niet meer verandert onder invloed van de omgevingstemperatuur.



Figuur 2.1: Een grafisch-schematische weergave van een boorveld [3].

vloeistof haar koude afgeeft via een warmtewisselaar aan een secundaire vloeistof. Deze secundaire vloeistof kan dan bijvoorbeeld gebruikt worden om een ruimte mee te koelen [4]. Merk op dat door (passief) te koelen op deze manier de anders verloren warmte nu in de ondergrond wordt geïnjecteerd waar deze later aangewend kan worden (cf. infra).

2.1.3 Actief koelen met behulp van het boorveld

Indien de temperatuur in de ondergrond te warm wordt om nog effectief passief te kunnen koelen, kan er op actief koelen overgeschakeld worden. Hierbij wordt er een compressiekoelmachine gebruikt om de warmte, die via het secundair circuit aan een ruimte onttrokken werd, in de ondergrond te injecteren [4].

Deze technologie is door de compressie duurder dan passief koelen. Het rendement van actief koelen kan beschreven worden met de parameter COP_r (soms ook aangeduid met de energie-efficiëntieratio (EER)) gedefinieerd als $COP_r = Q_L/W$ met Q_L het warmtevermogen dat onttrokken wordt door W elektrisch vermogen [5].

2.1.4 Airco/compressiekoelmachine

Een airco² heeft een volledig gelijkaardig werkingsprincipe als het actief koelen van hierboven. Hierbij wordt enkel de warmte niet afgegeven aan een boorveld maar aan de omgeving. Hoewel hier dus energie verloren gaat, kan het soms noodzakelijk zijn dit te doen, omdat de temperatuur van het boorveld binnen bepaalde grenzen moet blijven. Ook een airco heeft een bepaalde COP_r [4].

2.1.5 Grondwarmtepomp

Net zoals er door actieve/passieve koeling energie in de ondergrond kan worden geïnjecteerd, kan deze door gebruik te maken van een warmtepomp ook worden aangewend. Het rendement van deze technologie is beschreven door de COP van de

²In deze tekst wordt voor een compressiekoelmachine die geen gebruik maakt van het boorveld de naam *airco* gebruikt om het onderscheid met het actief koelen duidelijk te maken.

verwarming gedefinieerd als $COP_v = Q_H/W$ waarbij Q_H het warmtevermogen is dat door het elektrisch vermogen W geleverd kan worden [5].

2.1.6 Gascondensatieketel

Een gascondensatieketel maakt gebruik van aardgas om zijn warmte te produceren. Het verschil met een gewone gasketel is dat in dit laatste geval de rookgassen, die nog een zeer hoge temperatuur hebben en dus energetisch van waarde zijn, ook gebruikt worden. In een condensatieketel wordt namelijk het aanwezige water uit de rookgassen gecondenseerd om op die manier een groot deel van de energie uit de rookgassen te recupereren die anders verloren gaat. Op deze manier kunnen zeer hoge energetische rendementen bekomen worden [6].

2.1.7 Lucht-waterwarmtepomp

Een lucht-waterwarmtepomp werkt op basis van hetzelfde principe als een grondwarmtepomp maar gaat zijn energie uit de omgevingslucht halen. Het rendement van deze warmtepomp is meer tijdsafhankelijk dan een grondwarmtepomp omdat de omgevingstemperatuur een groter temperatuursbereik heeft dan de ondergrond. De (maximale) COP kan namelijk ook geschreven worden als: $COP_v = Q_H/W = \frac{T_H}{T_H - T_L}$ met T_H de temperatuur waarbij de warmte van het werkingsfluidum wordt afgegeven en T_L de temperatuur van de omgeving. Hieruit blijkt duidelijk de sterke afhankelijkheid van het rendement aan de omgevingstemperatuur T_L [5].

2.1.8 Zonnecollector

Zonnecollectoren zijn componenten die bestaan uit een leiding die in een metalen frame gemonteerd zit, dat langs de zijkanten geïsoleerd is om warmteverlies te vermijden. Door een glazen plaat aan de bovenzijde komen zonnestrallen binnen die de binnenkant van de collector en aldus het fluidum in de leidingen verwarmen [7]. De verwarming die op deze manier gerealiseerd kan worden, is zeer goedkoop al is deze zeer sterk afhankelijk van de hoeveelheid zon op ieder moment.

2.1.9 Droge koeler

Een droge koeler is in wezen niets anders dan een warmtewisselaar die een warme instroom krijgt en die deze door middel van een luchtstroom afkoelt. Het is dus noodzakelijk dat de buitentemperatuur voldoende laag is om dit te laten gebeuren³ [8]. Merk op dat de koeling an sich hier gratis gebeurt, maar dat de ventilatoren die de lucht over de warmtewisselaar blazen, wel heel wat elektrisch vermogen vereisen [9]. Het is ook mogelijk dat het water niet in een gesloten circuit zit, maar rechtstreeks in contact met de lucht komt. Een voorbeeld van zo een technologie is een koeltoren. Een koeltoren kan gebruikt worden om voor grote vermogens te koelen. Warm water

³Merk op dat het ook mogelijk is om via hetzelfde principe een koude stroom 's zomers op te warmen met de omgevingslucht. Deze toepassing van de droge koeler wordt verder niet gebruikt.

wordt in een koeltoren naar beneden gedruppeld. Terwijl het water naar beneden valt, waar het opgevangen wordt, verdampt een 3% van het fluïdum. Hierdoor daalt de rest van fluïdum een 18°C in temperatuur, waarna deze stroom weer naar het proces kan worden gestuurd. In dit proces moet er continu water toegevoegd worden omdat een percentage telkens verdampt [10, 11]. Een koeltoren wordt verder in deze thesis niet in rekening gebracht, maar zou een mogelijke uitbreiding van de set aan technologieën kunnen zijn.

2.2 Validatiemethodes

In Hoofdstuk 7 gaan er verschillende dimensioneringsmethodes gevalideerd worden. De twee programma's die hiervoor gebruikt worden zijn, in volgorde van stijgende accuraatheid, maar eveneens stijgende complexiteit: Earth Energy Designer (EED) en Dymola (Modelica-omgeving). Deze staan hieronder uitgelegd.

2.2.1 Earth Energy Designer (EED)

Earth Energy Designer is een commerciële toepassing die voor een gegeven (thermische) basismaand- en piekmaandbelasting een boorveld met gegeven grondeigenschappen en geometrie kan dimensioneren. Het is een programma dat snel en eenvoudig werkt, maar in tegenstelling tot Modelica geen complexe dynamische simulatie uitvoert [12]. Zo superponeert EED de piekbelasting op het einde van de maand met de assumptie dat deze geen invloed heeft op de grondtemperatuur op lange termijn [13]. EED viel oorspronkelijk onder een dimensioneringsalgoritme met nauwkeurigheidslevel 3⁴, al is de laatste versie van EED (versie 4) ook een level 4-algoritme [14]. In deze thesis wordt EED echter enkel als level 3 gebruikt.

2.2.2 Modelica - IDEAS

Voor een effectieve dynamische simulatie van de temperatuur in het boorveld wordt in deze thesis gebruik gemaakt van de Modelica-taal. Dit is een open-sourceprogrammeertaal die objectgericht is en gebaseerd is op fysische vergelijkingen die betrekking hebben op een bepaald systeem zoals bijvoorbeeld pompen of ook een boorveld [15]. Er is geen noodzaak om de vergelijkingen in een oorzakelijk verband weer te geven: zolang de nodige randcondities aanwezig zijn, zullen de variabelen berekend worden [16]. Meer specifiek wordt de IDEAS-bibliotheek gebruikt die alle componenten met betrekking tot het boorveld bevat en waarvan de correctheid door vele experimenten is gevalideerd [17].

⁴De betekenis van de verschillende levels staan uitgewerkt onder Sectie 5.2.

Hoofdstuk 3

Uitdagingen

Deze thesis heeft als doel een economische optimalisatie te maken van een geothermisch verwarmings- en koelsysteem. De dimensionering van zo een systeem brengt drie problemen met zich mee: de hybride installatie, de balancerings van het boorveld en de energiestroom in twee richtingen doorheen sommige componenten [18]. De eerste twee problemen vormen de rode draad doorheen deze tekst en daarom is het van belang deze goed te begrijpen. Het derde probleem wordt voor de volledigheid vermeld. In de volgende drie secties worden deze problemen in volgorde toegelicht.

3.1 Hybride systemen

Een volledige verwarmings- en koelinstallatie die, naast andere technologieën, onder andere gebruik maakt van een boorveld, kan beschouwd worden als een hybride systeem. Het is een grote uitdaging om te bepalen wanneer welke technologie een bepaald piekvermogen of energie gaat leveren. Deze uitdaging is terug te vinden enerzijds in de dimensionering van de volledige installatie (i.e. welk vermogen moet er van welke technologie voorzien worden), maar evenzeer in de eigenlijke aansturing van een reeds geïnstalleerd systeem.

In deze thesis staat de dimensionering van de gehele installatie centraal. In de volgende hoofdstukken is een methode uitgewerkt die een afweging maakt tussen verschillende technologieën die deel uit maken van het hybride systeem en hoe groot deze gedimensioneerd moeten worden om uiteindelijk tot een kostenefficiënt geheel te komen.

3.2 Veldbalancerings

Specifiek met betrekking tot de technologieën die gebruik maken van het boorveld (het verwarmen via een grondwarmtepomp en het koelen met behulp van actieve of passieve koeling alsook mogelijke regeneratie (cf. infra)) dient er aandacht te worden besteed aan de temperatuur van de ondergrond. Deze dient namelijk tussen bepaalde grenzen te blijven. Deze grenzen impliceren dat er niet onbeperkt warmte

of koude uit de bodem kan gehaald en geïnjecteerd worden. Dit is het probleem van de veldbalancerings.

Een gebalanceerd veld is een veld waar op jaarbasis evenveel energie uit ontrokken wordt als er in geïnjecteerd wordt. Op die manier is de grondtemperatuur op het einde van een cyclus (veelal jaarlijks) dezelfde als in het begin. Er bestaan twee verschillende strategieën om tot een gebalanceerd veld te komen. Beide zijn voorgesteld in Figuur 3.1.

Een eerste strategie bestaat erin om het boorveld te dimensioneren en te gebruiken voor de maximale energievraag. In warmtevraaggedomineerde gevallen (gebouw 1) is dat de warmtevraag en in koelvraaggedomineerde gevallen (gebouw 2) is dat de vraag naar koeling. In het geval van gebouw 1 impliceert dit dat er meer energie uit de grond wordt gehaald en dat deze, door gebruik te maken van een andere technologie, weer in de grond moet worden geïnjecteerd. Dit heet *regeneratie*. Eenzelfde redenering kan worden gemaakt voor gebouw 2.

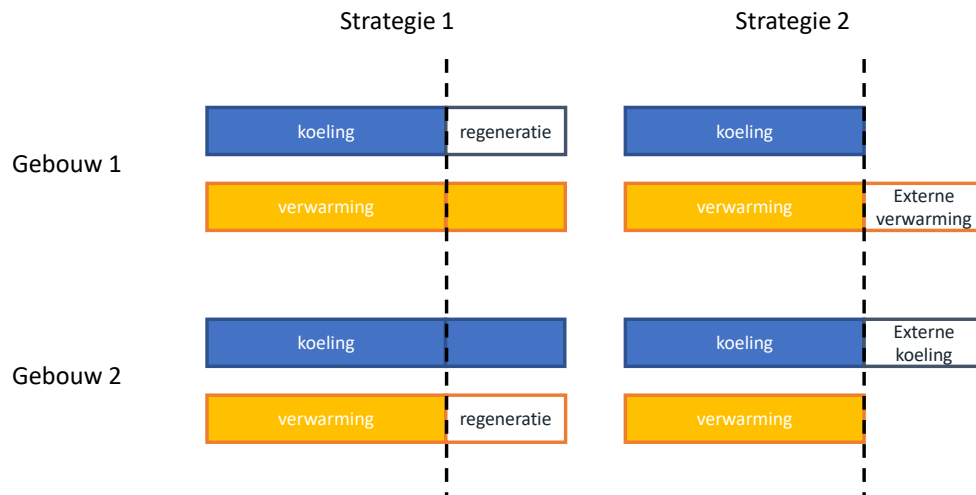
In de tweede strategie gaat het veld gedimensioneerd worden op basis van de minimale energievraag. De extra warmte- of koelvraag, voor respectievelijk gebouw 1 en gebouw 2, dient dan door een externe technologie te worden geleverd. Het valt op dat voor beide strategieën er externe technologieën nodig zijn indien een volledig gebalanceerd veld gewenst is.

Veldbalancerings heeft een zeer grote invloed op de grootte van het boorveld en aldus ook op de investeringskost [19]. In deze thesis is dus evenzeer de boorveldbalans mee in rekening gebracht voor de economische optimalisatie.

3.3 Duale energiestromen

Een laatste probleem dat van toepassing is bij geothermische verwarmings- en koel-systemen, maar dat niet zozeer van tel gaat zijn in deze thesis, is dat van duale energiestromen. Bepaalde componenten in het systeem worden namelijk voor zowel verwarming als koeling gebruikt, zoals bijvoorbeeld warmtewisselaars of reversibele warmtepompen. De componenten dienen gedimensioneerd te zijn op de *worst case* van zowel verwarming als koeling, maar dienen evenzeer in een ander werkingspunt ook rendabel te werken. Een voorbeeld van dit probleem is weergegeven in Figuur 3.2 voor het geval van een warmtewisselaar. Tabel 3.1 bevat bijhorende richtwaarden.

Uit beide werkingspunten dient de grootste component geselecteerd te worden. In dit concrete geval is dat dus de warmtewisselaar uit geval 1 ($UA_1 > UA_2$). Hierdoor is de warmtewisselaar voor de tweede situatie nu geen $300kW/K$ maar $400kW/K$ geworden. Dit heeft zijn gevolgen op de ΔT_2 en \dot{V}_2 . Deze worden nu namelijk: $\Delta T_2 = 5.5^\circ C$ en $\dot{V}_2 = 19.5l/s$.



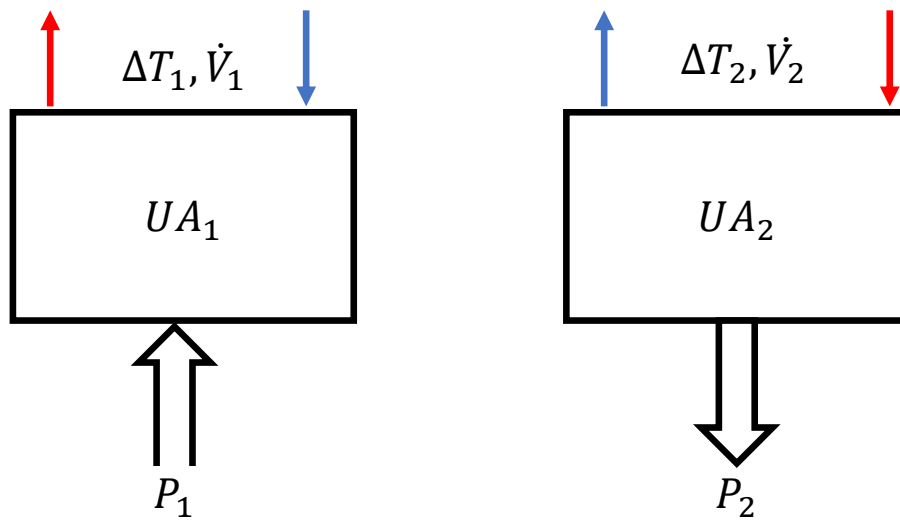
Figuur 3.1: Grafische illustratie van de verschillende aanpakken voor de veldbalancerings. Een gebalanceerd veld is te vinden ter hoogte van de stippellijn. (Figuur vrij naar [18].)

Merk op dat het hoogste thermische vermogen in geval 2 wordt bereikt, maar dat de warmtewisselaar alsnog op geval 1 wordt gedimensioneerd. Langs de andere kant is voor geval 2 dan weer het massadebiet groter, dus bepaalt deze gebruikssituatie de dimensionering van pompen en kleppen (vrij naar [18]).

Dit voorbeeld laat zien dat voor de dimensionering van bepaalde componenten in hybride systemen een zekere waakzaamheid vereist is om geen overhaaste conclusies te nemen. Zoals reeds hierboven gesteld werd, gaat deze specifieke uitdaging in wat volgt niet meer nader onderzocht worden. In deze thesis gaan namelijk niet de componenten gedimensioneerd worden waarvoor dit probleem zou kunnen optreden.

Parameter	Waarde
P_1	$400kW$
P_2	$450kW$
ΔT_1^1	$6^\circ C$
ΔT_2	$5^\circ C$
UA_1	$400kW/K$
UA_2	$300kW/K$
\dot{V}_1	$15.9l/s$
\dot{V}_2	$21.5l/s$

Tabel 3.1: Richtwaarden bij het probleem van duale energiestromen.



Figuur 3.2: Voorbeeld van het probleem van duale energiestromen.

¹Het temperatuurverschil is altijd positief gedefinieerd.

Hoofdstuk 4

Casestudies

Alvorens een methodologie en algoritme voor de economische optimalisatie bekeken kan worden, is het interessant om via enkele casestudies inzicht te krijgen in enkele ogenschijnlijke wetmatigheden die komen kijken bij de dimensionering en kostprijs van een geothermisch verwarmings- en koelsysteem. Deze eigenaardigheden kunnen dan als uitgangspunt dienen om in Sectie 6 een concrete methodologie uit te werken.

In dit hoofdstuk is zowel een geval van een koelvraaggedomineerd alsook een warmtevraaggedomineerd gebouw opgenomen. Deze zijn het onderwerp van respectievelijk Sectie 4.2 en 4.3. Elke sectie zal eindigen met enkele conclusies. De algemene assumpties zijn beschreven in Sectie 4.1.

4.1 Algemene assumpties

In de volgende secties worden geothermische verwarmings- en koelsystemen gedimensioneerd voor zowel koude- als warmtevraaggedomineerde gevallen bij twee verschillende ondergronden. Voor deze cases worden slechts vier verschillende technologieën in rekening gebracht: gasketel¹, grondwarmtepomp (GSHP), airco en passief koelen². De kostprijzen van deze technologieën zijn te vinden in Tabel 4.1. Voor deze kostprijzen is enkel de initiële investeringskost in rekening gebracht en zijn levensduur en onderhoudskosten achterwege gelaten. Ook de tijdswaarde van geld is hier buiten beschouwing gelaten [20].

De kostprijzen van gas en elektriciteit zijn in wat volgt constant en respectievelijk $0,0464\text{€}/kWh$ en $0,1466\text{€}/kWh$ verondersteld [21]. De piekbelasting is telkens voor 6 uur per maand en de dimensionering is voor een periode van 20 jaar. Verdere parameters die belangrijk zijn voor de dimensionering van het boorveld zijn gegeven in Tabel 4.2. Deze gegevens zijn grotendeels gebaseerd op (Ahmedfard M., 2017) [22]. In de cases is *Earth Energy Designer* (EED) gebruikt voor de dimensionering van het boorveld.

¹In deze tekst bedoelt dit altijd een condensatieketel.

²Uitleg bij deze verschillende technologieën is te vinden in Sectie 2.1.

Technologie	Kostprijs	Bereik	Extra info
Gasketel	$85,405x + 9451$	$x \in [25, 800][kW]$	-
Grondwarmtepomp	$83,368x + 11725$	$x \in [34, 300][kW]$	COP = 5
Passief koelen	$14,421x + 1814$	$x \in [28, 472][kW]$	-
Airco	$80,084x + 12456$	$x \in [21, 1335][kW]$	COP = 3
Boorveld	$32,0x$	$x[m\text{diepte}]$	10 x 12 boorgaten

Tabel 4.1: Kostenfuncties voor de verschillende technologieën [21].

Fluidumparameters	
Thermische conductiviteit	$0.513 \frac{W}{mK}$
Specifieke warmtecapaciteit	$4000 \frac{kgK}{kgK}$
Dichtheid	$1060 \frac{kg}{m^3}$
Viscositeit	$1,79 \frac{g}{ms}$
Maximumtemperatuur	$16^\circ C$
Minimumtemperatuur	$0^\circ C$
Massadebiet	$4 \frac{l}{s}$
Grondparameters	
Thermische conductiviteit	$1,8 \frac{W}{mK}$ en $3,5 \frac{W}{mK}$
Soortelijke warmte	$2,4 \frac{MJ}{m^3K}$
Temperatuur aardoppervlak	$10^\circ C$
Boorgatparameters	
Type	Enkele U-buis
Boorgatspatiëring	$6.5m$
Boorgatstraal	$75mm$
Binnenstraal leiding	$13mm$
Buitenstraal leiding	$16,7mm$
Center-tot-centerafstand leidingen	$62mm$
Thermische conductiviteit van de leiding	$0.4 \frac{W}{mK}$
Thermische conductiviteit van de vulling	$1.0 \frac{W}{mK}$
Contactweerstand	$0.0 \frac{mK}{W}$
Resulterende boorgatweerstand	$0.2 \frac{mK}{W}$

Tabel 4.2: Parameters met betrekking tot de dimensionering van het boorveld.

Maand	Piekvermogen [kW]		Basisbelasting [%]	
	Koeling	Verwarming	Koeling	Verwarming
Januari	0	200	2,5	15,5
Februari	0	179	5,0	14,8
Maart	34	127	5,0	12,5
April	69	69	5,0	9,9
Mei	133	0	7,5	6,4
Juni	187	0	10,0	0,0
Juli	213	0	20,0	0,0
Augustus	240	0	20,0	0,0
September	160	50	10,0	6,1
Oktober	37	106	7,5	8,7
November	0	149	5,0	11,7
December	0	170	2,5	14,4

Tabel 4.3: Gebruikte belasting voor de koelvraaggedomineerde casestudie.

4.2 Koelvraaggedomineerd gebouw

Voor de casestudie van het koelvraaggedomineerde gebouw is uitgegaan van een gebouw met een warmtevraag van $200MWh/j$ en een piekvermogen van $200kW$ verwarming. De koeling daarentegen is op jaarbasis $240MWh$ met een piekvermogen van $240kW$. De verdeling per maand is weergegeven in Tabel 4.3. Merk op dat de verdeling van basisbelasting nog vermenigvuldigd moet worden met $200MWh^3$ en $240MWh$ voor respectievelijk de warmte- en koelvraag. De piekvermogens daarentegen zijn wel voor elke maand rechtstreeks gegeven.

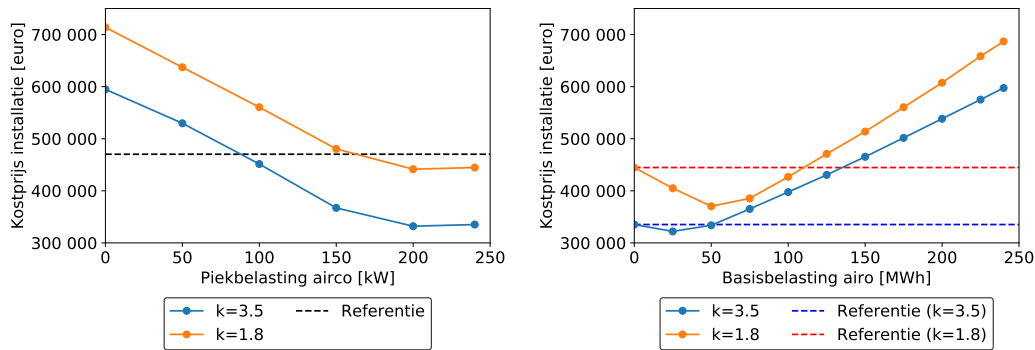
4.2.1 Werkwijze

Omdat de gegeven situatie koelvraaggedomineerd is en er een positieve onbalans is (i.e. het veld wordt jaar na jaar warmer), werd eerst onderzocht wat het effect van een reductie van het piekvermogen van de koeling op de kostprijs⁴ van de gehele installatie is. Hiervoor werd in intervallen van $50kW$ het piekvermogen koeling, initieel geleverd door het passief koelen, toegekend aan een externe airco/compressiekoelmachine. De resultaten hiervan zijn te vinden in Figuur 4.1(a) waar de referentielijn de kostprijs voorstelt voor het geval dat de gehele vraag door een airco en gasketel wordt geleverd.

Het valt op dat zowel voor de bodem met een thermische geleidbaarheid van $1.8W/mK$ als voor de bodem met $k = 3.5W/mK$ de meest gunstige situatie te vinden is in het geval dat er geen piekvermogen koeling meer aanwezig is. Het valt eveneens op dat de kostencurves sterk op elkaar gelijken, maar dat de kostprijs

³Voor het boorveld komt dit neer op een belasting van $160MWh$ voor verwarming omdat de COP van de GSHP op 5 wordt verondersteld (zie ook Tabel 4.1).

⁴Voor de kostprijs werd rekening gehouden met de investeringskost enerzijds, maar anderzijds ook met de werkingskost over een periode van 20 jaar.



(a) Invloed van piekreductie.

(b) Invloed van basisbelastingreductie.

Figuur 4.1: Effect van de reductie in piekbelasting en basisbelasting op de totale kostprijs van de installatie voor een koelvraaggedomineerd geval.

van een installatie bij een ondergrond met een thermische conductiviteit die hoger is, goedkoper is. Dit is te begrijpen omdat een bodem met hoge conductiviteit beter de energie gaat kunnen verdelen en de temperatuurspieken dus kleiner worden [23]. Omdat het veld gedimensioneerd wordt binnen bepaalde temperatuurgrenzen, kan hierdoor het veld dus kleiner zijn.

Vanaf een bepaald punt is een verdere reductie in piekvermogen niet meer financieel gunstig. Dit komt omdat de grootte van het boorveld dan niet langer bepaald wordt door het piekvermogen (koeling in dit geval) maar door de basisbelasting⁵.

Na deze oefening valt op dat er momenteel nog geen overtuigende financiële reden is om een boorveld te installeren in plaats van een gasketel met airco voor een bodem met lagere conductiviteit.

Het veld echter is op dit moment nog altijd ongebalanceerd. In een tweede stap is onderzocht of een reductie van de basisbelasting koeling voordelig is. Er werd telkens een bepaalde hoeveelheid basisbelasting koeling (op jaarbasis) weggehaald en aan de airco toegekend. De resultaten hiervan zijn te vinden in Figuur 4.1(b). Merk op dat als referentie hier gekozen is voor het goedkoopste geothermisch verwarmingssysteem voor beide bodems, dus in de afwezigheid van piekvermogen koeling door het passief koelen.

Uit Figuur 4.1(b) valt af te leiden dat in het geval van een bodem met hogere conductiviteit de potentiële besparing door de onbalans te verminderen minimaal is. De reductie in kost door een kleiner boorveld te gebruiken, wordt haast meteen teniet gedaan door de hogere werkingskost van de airco die nu voor basisbelasting koeling

⁵Dit komt omdat zowel het piek- als het basisvermogen dezelfde nulreferentie hebben. Het is dus niet zo dat het piekvermogen bovenop het basisvermogen is gedefinieerd.

wordt gebruikt. Voor de situatie met een lagere thermische conductiviteit is echter wel een significante besparing mogelijk. Merk eveneens op dat de minimale kost in dit geval niet de gebalanceerde situatie is (deze zou bij $240 - 160MWh = 80MWh$ airco zijn). Hier is het veld effectief het kleinst, maar de werkingskost van de airco is wederom te hoog om nog voordelig te zijn.

4.2.2 Conclusies en discussie

Deze casestudie toont meteen enkele zaken heel duidelijk aan die als uitgangspunt kunnen dienen voor verdere hoofdstukken. De voornaamste conclusies zijn:

- De reductie van piekbelasting heeft een zeer significant effect op de kostprijs van de gehele installatie. In het geval van een goed geleidende bodem is deze geothermische installatie al voordeliger ten opzichte van de referentie, dit in tegenstelling tot een slechter geleidende bodem omdat in dit laatste geval de potentiële besparing minder uitgesproken is.
- De reductie van de basisbelasting heeft vooral een positief effect op een slecht geleidende bodem.
- Door gebruik te maken van regeneratie kan het boorveld meer gebalanceerd worden. In dit geval komt dat neer op warmte onttrekken uit de ondergrond door bijvoorbeeld 's nachts een koeltoren te laten werken die de grond afkoelt. Indien dit relatief goedkoop kan gebeuren, kan dit mogelijks door de reductie in boorveldgrootte financieel voordelig zijn.
- Omdat hier enkel naar passief koelen is gekeken, ligt de bovengrens van de temperatuur van het boorveld op $16^{\circ}C$. Indien ook gebruik kan gemaakt worden van actief koelen, kan deze grens verhoogd worden en kan een kleiner (en aldus goedkoper) boorveld gebruikt worden. Actief koelen brengt echter ook een grotere werkingskost met zich mee, waardoor ook hier naar een optimum gaat moeten gezocht worden.

Maand	Piekvermogen [kW]		Basisbelasting [%]	
	Koeling	Verwarming	Koeling	Verwarming
Januari	0	375	0	15,5
Februari	0	335	2,5	14,8
Maart	22	239	7,5	12,5
April	44	129	7,5	9,9
Mei	83	94	7,5	6,4
Juni	117	0	10,0	0,0
Juli	134	0	20,0	0,0
Augustus	150	48	20,0	0,0
September	100	95	10,0	6,1
Oktober	23	200	7,5	8,7
November	0	280	7,5	11,7
December	0	319	0,0	14,4

Tabel 4.4: Gebruikte belasting voor de warmtevraaggedomineerde casestudie.

4.3 Warmtevraaggedomineerd gebouw

Voor het warmtevraaggedomineerde geval is uitgegaan van een warmtevraag van $375MWh/j$ en een piekvermogen van $375kW$ ⁶. De koeling daarentegen is verondersteld op $150MWh/j$ met $150kW$ piekvermogen. De verdeling van deze vermogens per maand is te vinden in Tabel 4.4. Merk op dat wederom de percentages van de basisbelasting nog met de warmte- en koudevraag op jaarbasis dienen te worden vermenigvuldigd.

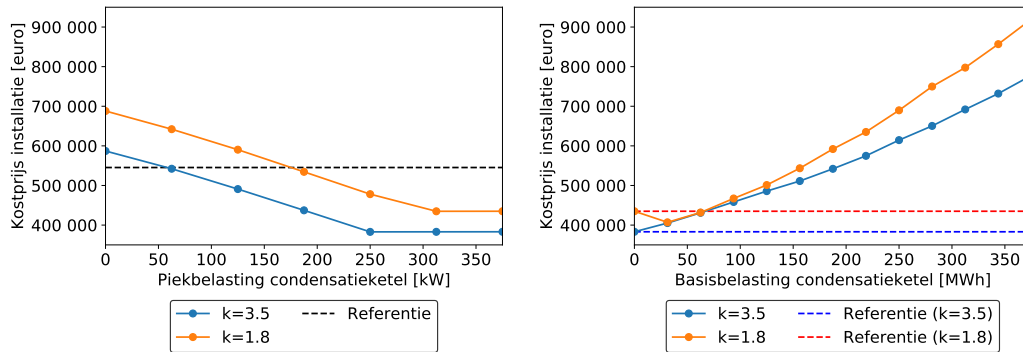
4.3.1 Werkwijze

Evenals voor de situatie van een koelvraaggedomineerd veld in Sectie 4.2.1 werd hier eerst onderzocht wat het effect van de systematische reductie van piekwarmtevraag als effect op de totale kostprijs van de installatie is. Het resultaat van deze oefening is te zien in Figuur 4.2(a).

Zoals ook in de vorige case het geval was, valt een systematische reductie in kostprijs op die voor beide bodems quasi gelijk loopt. Opmerkelijk is dat in dit specifieke geval de stagnatie in kostprijsreductie niet te wijten is aan een temperatuurslimitering basisbelasting (zoals dat in het koelvraaggedomineerde geval wel was), maar wel door de piekkoeling. Dit is te zien in Figuur 4.3.

Het valt ook op dat deze limiet voor het geval van de bodem met $k = 3.5W/mK$ sneller optreedt (rond de $250kW$ piek gasketel) dan bij de bodem met $k = 1.8W/mK$ (rond de $300W/mK$). Dit is omdat in een bodem met lagere thermische conductiviteit de onbalans langer van belang gaat zijn dan bij een bodem met grotere conductiviteit.

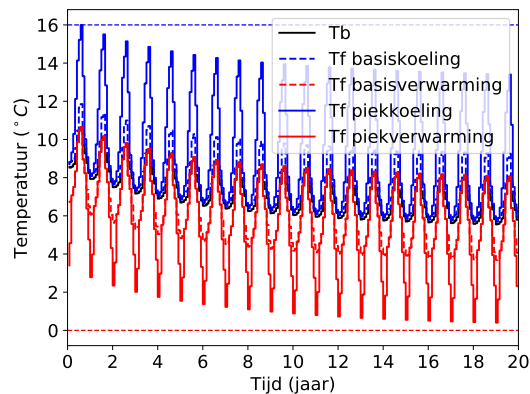
⁶Voor de belasting van het boorveld is dit (met een COP = 5) $300MWh/j$ en $300kW$.



(a) Invloed van piekreductie.

(b) Invloed van basisbelastingreductie.

Figuur 4.2: Effect van de reductie in piekbelasting en basisbelasting op de totale kostprijs van de installatie voor een warmtevraaggedomineerd geval.



Figuur 4.3: Temperatuurverloop in het warmtevraaggedomineerde geval na vermindering van 150kW aan piekvermogen.

Deze ondervindt dus pas later belemmering door piekkoeling.

In een tweede stap is vervolgens onderzocht wat het effect van een verdere reductie van de onbalans op de totale kostprijs is. Hiervoor werd er systematisch een deel van de basisbelasting verwarming door een gasketel in plaats van de GSHP geleverd. Het resultaat hiervan is terug te vinden in Figuur 4.2(b), waarbij wederom de goedkoopste geothermische installatie van hierboven als referentie is gebruikt.

Net zoals in het koelvraaggedomineerde geval heeft het verminderen van de basisbelasting weinig effect op de kostprijs van de installatie voor een bodem met hoge thermische conductiviteit. In dit specifieke geval is een reductie in onbalans duurder. Voor de bodem met een lagere conductiviteit is er daarentegen wel een

kleine besparing mogelijk. Beiden bodems zijn hier echter relatief snel begrensd door de piekkoeling. Een reductie in basisbelasting gaat daarom niet verder voor een daling in boorveldgrootte en aldus kostprijs zorgen.

4.3.2 Conclusie en discussie

Hieronder worden kort enkele opmerkelijke punten aangehaald met betrekking tot de warmtevraaggedomineerde case. Deze zullen in latere hoofdstukken als uitgangspunt dienen voor de ontwikkeling van een algoritme.

- De reductie in piekvermogen verwarming geeft voor beide bodems een zeer significant verschil. In tegenstelling tot de vorige case is er hier al een duidelijke financiële reden om voor een geothermisch verwarmings- en koelsysteem te opteren voor beide bodems.
- De reductie in basisbelasting van de verwarming heeft weinig tot geen effect op de kostprijs.
- Omdat zelfs in dit warmtevraaggedomineerde geval het veld gedimensioneerd en begrensd werd door de piekkoeling, rijst de vraag of door gebruik te maken van een externe airco, die een deel van het piekkoelvermogen kan opnemen, het veld niet weer gelimiteerd is door de verwarmingskant. In dat geval kan namelijk een reductie van de basisbelasting verwarming of regeneratie wel goedkoper uitvallen. Dit wordt eveneens verder in latere hoofdstukken onderzocht.

Hoofdstuk 5

Dimensionering van het boorveld

In dit hoofdstuk staat beschreven hoe een boorveld gedimensioneerd kan worden. De grootte van het boorveld gaat bepaald worden op basis van de minimale en maximale temperatuur die de ondergrond mag hebben en de aangelegde belasting. Het is daarom van belang eerst te weten hoe de temperatuur van een boorveld reageert in de tijd op een bepaalde belasting. Dat is het onderwerp van Sectie 5.1. In Sectie 5.2 staan vervolgens enkele classificaties van dimensioneringsalgoritmes (met verschillende nauwkeurigheid) vanuit de literatuur opgelijst.

5.1 Thermische responsie van een boorveld

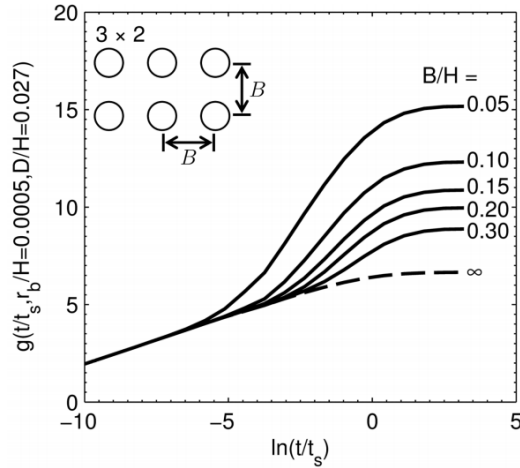
De berekening van de temperatuur in de ondergrond is een complex driedimensionaal transiënt warmtediffusieprobleem. Doordat daarnaast alle verschillende boorgaten in eenzelfde veld ook nog eens met elkaar warmte uitwisselen, is een analytische oplossing van de temperatuur in de ondergrond uitermate complex [24].

Een manier om met dit probleem om te gaan is door op korte en lange tijdschalen naar het veld te kijken en voor beide een model te ontwikkelen. Deze kunnen in een tweede stap samengevoegd worden om een gecombineerd/hybride model te verkrijgen dat zowel op korte als lange tijdschalen correct is [21].

5.1.1 Grondresponsie

De interactie tussen de verschillende boorgaten manifesteert zich vooral op de langere tijdschalen, wanneer de transiënte effecten zijn uitgewerkt. Dit doet zich voor op tijdstippen t met $t > \frac{5r_b^2}{k_s}$ waarbij r_b de diameter van het boorgat en k_s de thermische conductiviteit van de grond is [25].

Om de boorgattemperatuur op lange termijn te kennen, stelde Eskilson in 1987 het concept van de g -functie voor. Deze functie geeft een genormaliseerde boor-



Figuur 5.1: Voorbeeld van een g -functie voor verschillende verhoudingen van de boorgatspatiëring tot de boorgatdiepte (met $t_s = H^2/(9k_s)$) [21, 27].

wandtemperatuur g terug in functie van een genormaliseerde tijd (bijvoorbeeld het Fourier-getal) voor een constante warmteflux per meter q en dit voor een gegeven boorvelddimensionering en -layout [26]. Vaak zijn deze g -functies getabelleerd voor verschillende dimensies en configuraties van boorvelden en worden andere waarden bekomen door te interpoleren. Een grafisch voorbeeld is terug te vinden in Figuur 5.1.

Er geldt dat

$$g(t/t_s, r_b/H) = (2\pi\lambda(T_b - T_g))/q$$

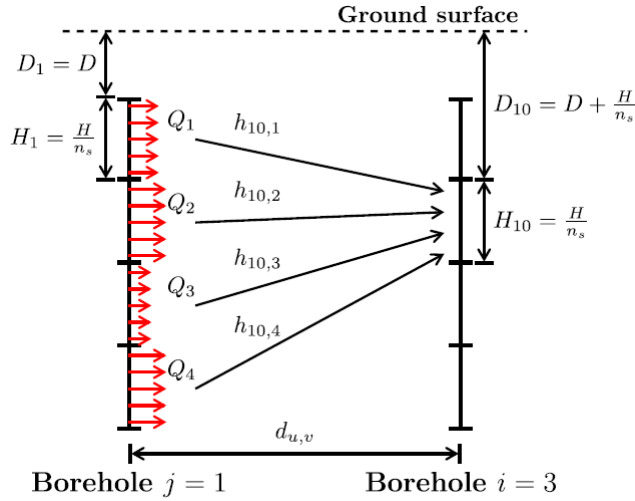
waarin $t_s = H^2/(9k_s)$ een dimensieloze tijd, λ de thermische conductiviteit van de vulling, T_b de temperatuur aan de rand van het boorgat en T_g de initiële, uniforme grondtemperatuur is [21].

Deze g -functies kunnen opgesteld worden door de verschillende boorgaten verticaal in N segmenten te verdelen. Elk van deze segmenten wordt vervolgens benaderd door een lijnbron, waarna de temperatuur op een boorgatwand bekomen wordt door de thermische effecten van elk van de segmenten op die wand te superponeren. Dit is grafisch weergegeven in Figuur 5.2, waar de temperatuur op het tweede segment van een zeker boorgat $i = 3$ het gecombineerd effect is van de verschillende warmtewisselingen van de andere boorgatsegmenten ($j = 1$).

De eindigelijnbenadering is echter op korte termijn niet correct. Hiervoor wordt de thermische responsie, bekomen zoals hierboven beschreven staat, gecorrigeerd door deze te vermeerderen met een thermische responsie die zich vooral manifesteert op de korte termijn. In een formule komt dit neer op

$$g(t) = g_{ELB}(t) + (g_{CB}(t) - g_{OLS}) \quad (5.1)$$

waarin $g(t)$ de uiteindelijke thermische responsie is die de som is van $g_{ELB}(t)$ het eindigelijnmodel (cf. supra) en het verschil tussen de responsie van een cilindrisch



Figuur 5.2: Grafische weergave van hoe ruimtelijke superpositie wordt gebruikt om de temperatuur op elk boorgatsegment te berekenen [16].

model $g_{CB}(t)$, waar het ruimtelijk karakter van het boorgat mee in rekening wordt genomen en een oneindiglijnmodel g_{OLS} . Voor een volledige mathematische uitwerking wordt de lezer doorverwezen naar (Laferrière et al, 2020), hier volstaat het om de voordelen van deze uitdrukking te bespreken.

Op de lange termijn, convergeert het verschil tussen de cilindrische benadering en de oneindiglijnbron naar een constante thermische weerstand¹, maar op korte termijn komt de eindiglijn- met de oneindiglijnbenadering overeen en overheerst in de totale responsie het cilindrisch model [16]. Op deze manier wordt een grondresponsiecurve bekomen die zowel op korte als op lange termijn relevant is.

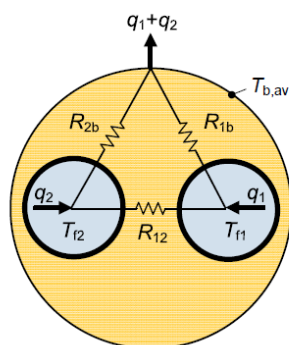
5.1.2 Fluïdumtemperatuur

Om de fluïdumtemperatuur te bepalen, moeten er nog twee zaken gebeuren. Eerst moet er een overgang worden gemaakt van de boorwandtemperatuur naar de fluïdumtemperatuur. Tenslotte moet ook in rekening worden gebracht dat omdat de belasting van het boorveld verandert, een temporele superpositie nodig is van de grondresponsiecurves. Beide zaken staan hieronder uitgelegd.

Van boorwandtemperatuur naar fluïdumtemperatuur

Om de fluïdumtemperatuur te berekenen wordt gebruik gemaakt van een thermische weerstandenmodel [21, 28]. Deze interne weerstanden kunnen onder andere berekend worden door gebruik te maken van het multipole-model [29]. Een voorbeeld van de

¹Deze constante correctieterm is diegene die Eskilson oorspronkelijk gebruikte.



Figuur 5.3: Thermische weerstanden voor het geval van een enkele U-buis [29].

interne weerstanden van een enkele U-buis is weergegeven in Figuur 5.3.

In deze figuur zijn T_{f1} en T_{f2} de fluïdumtemperaturen in de leidingen, R_{12} de thermische weerstand tussen de centra van beide leidingen en R_{2b} en R_{1b} de weerstanden van de leidingen tot de buitenkant van het boorgat met een gemiddelde temperatuur $T_{b,av}$. De warmteflux die van de omgeving komt per lopende meter door beide leidingen is $q_1 + q_2$ [29].

Op basis van deze weerstanden kan een equivalente boorgatweerstand R_b^* gedefinieerd worden als volgt

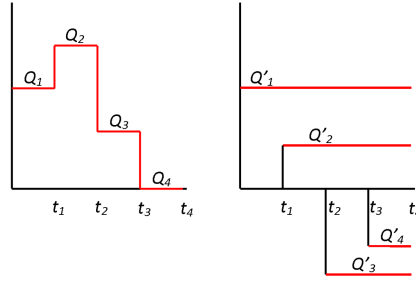
$$R_b^* = \frac{T_f - T_b}{q_b} \quad (5.2)$$

met T_f de gemiddelde fluïdumtemperatuur tussen in- en uitgang, T_b de gemiddelde boorgattemperatuur en q_b de warmteflux per meter [29]. Zoals uit Formule (5.2) blijkt, is het mogelijk de fluïdumtemperatuur te bepalen uit T_b indien de equivalente boorgatweerstand gekend is. Vaak wordt deze equivalente boorgatweerstand opgemeten, maar het is ook mogelijk deze theoretisch te berekenen. Daar deze afleiding te ver gaat voor het bestek van deze tekst, wordt de geïnteresseerde lezer doorverwezen naar (Claesson, 2018).

Temporele superpositie

Om de fluïdumtemperatuur te kunnen berekenen, is het van belang de boorwandtemperatuur T_b te kennen. In Sectie 5.1.1 staan de grondresponsies beschreven die hiervoor gebruikt worden, maar omdat de belasting in de tijd verandert, worden verschillende van deze responsies gesuperponeerd. Grafisch is dit weergegeven in Figuur 5.4.

Hieruit blijkt dat het volledige belastingsdiagram kan bekomen worden door de verschillende thermische pulsen Q'_1 tot en met Q'_4 te superponeren. Voor een



Figuur 5.4: Grafische voorstelling van de temporele superpositie [30].

gemiddelde wandextractie² $Q(t)[W]$ kan de boorgattemperatuur bepaald worden als volgt

$$T_b(t) = T_0 - \frac{1}{2\pi k_s} \int_0^t Q(t-t') \frac{dg}{dt}(t') dt' \quad (5.3)$$

met T_g de initiële grondtemperatuur, k_s de thermische conductiviteit van de ondergrond en g de g -functie [31].

Voor een discrete belasting zoals in Figuur 5.4 kan deze betrekking herschreven worden als

$$T_b(t) = T_g - \sum_{i=1}^n \frac{(q'_i - q'_{i-1})}{2\pi k_s} g\left(\frac{t_n - t_{i-1}}{t_s}, \frac{r_b}{H}, \frac{B}{H}\right) \quad (5.4)$$

met $t = n\Delta t$ met Δt het tijdsinterval, B de afstand tussen de boorgaten en q_i de belasting per meter in interval i [14].

Nu de boorwandtemperatuur gekend is, kan de gemiddelde fluïdumtemperatuur bepaald worden door gebruik te maken van Formule (5.2). Hiervoor geldt dat

$$T_f(t) = T_b(t) - R_b^* Q(t) \quad (5.5)$$

met R_b^* de effectieve boorgatweerstand zoals deze hierboven is gedefinieerd [29, 31].

Het dient verder te worden opgemerkt dat in deze thesis voor de berekening van de grondresponsiefuncties de pygfunction-module voor Python door M. Cimmino wordt gebruikt [32].

5.2 Beschikbare dimensioneringsalgoritmen

Algemeen kunnen de verschillende beschikbare dimensioneringsmethoden gecategoriseerd worden in vijf verschillende levels met toenemende complexiteit. Een voordeel van een complexere methode is dat deze een grotere zekerheid op correcte resultaten geeft, maar vereist daarvoor meer rekenkracht. Voor het doel van deze verhandeling is het belangrijk een snel en voldoende nauwkeurig algoritme te gebruiken. De verschillende levels worden hieronder kort besproken, waarna in Hoofdstuk 7 beschreven staat welke dimensioneringsmethode verder in deze tekst gebruikt gaat worden.

² Q is dus positief als er warmte uit het boorgat onttrokken wordt.

- **Level 0**

Het laagste level heeft betrekking tot enkele vuistregels voor de dimensionering, voornamelijk van toepassing op kleinere boorvelden. Vaak bestaan deze uitdrukkingen uit een eenzijdig verband tussen de vereiste boorveldlengte en het vereiste piekvermogen [14]. In België is de vuistregel ongeveer een meter per 30W piekvermogen indien de belasting min of meer gebalanceerd is [33]. Deze werkwijze is eenvoudig, doch verre van nauwkeurig.

- **Level 1**

Alle levels, behalve de vuistregels, kunnen beschouwd worden als afgeleide versies van eenzelfde basisformule, gegeven in Vergelijking (5.6). Hierin stelt L de totale boorgat lengte voor, q_i de thermische grondpuls voor een bepaalde tijd i met bijhorende grondweerstand R_i . De belasting q_h stelt de piekbelasting voor met bijhorende effectieve boorgatweerstand R_b^* . T_m is de gemiddelde vloeistoftemperatuur (i.e. het gemiddelde van de inkomende en uitgaande stroming), T_g de grondtemperatuur op oneindig en T_p een penalisatietemperatuur te wijten aan het feit dat boorgaten in een veld met elkaar warmte uitwisselen [14].

$$L = \frac{\sum_{i=1}^N q_i R_i + q_h R_b^*}{T_m - (T_g + T_p)} \quad (5.6)$$

Een Level 1-dimensionering berekent de benodigde boorveldlengte door gebruik te maken van twee pulsen namelijk het maximale piekvermogen van verwarming en koeling [14]. De puls die de langste boorveldlengte geeft, wordt gekozen. Deze methode heeft echter dezelfde handicap als de vuistregels daar er enkel naar de piekvermogens wordt gekeken en dat onbalansen buiten beschouwing worden gelaten [13]. Dit probleem wordt bij de hogere levels aangepakt.

- **Level 2**

Het tweede level wordt ook wel eens de 3-pulsenmethode genoemd (zowel voor koeling als verwarming), omdat deze, in tegenstelling tot de vorige levels, naast het piekvermogen ook de maandbelasting (in de maand waarin het piekvermogen zich manifesteert) en de jaarlijkse onbalans in rekening gaat brengen [14]. Vergelijking (5.6) kan dan herschreven worden als:

$$L = \frac{q_y R_y + q_m R_m + q_h R_h + q_h R_b^*}{T_m - (T_g + T_p)} \quad (5.7)$$

waarin q_y , q_m en q_h respectievelijk de jaarlijkse, maandelijkse en piekvermogenpuls zijn, waarvan de lengtes van de pulsen respectievelijk 10 jaar, 1 maand en 6 uur zijn. Bij deze pulsen horen de thermische weerstanden R_y , R_m en R_h die op verschillende manieren kunnen bepaald worden zoals met behulp van de eindglijnmethode of het cilindermodel [14].

Om de interactie tussen de verschillende boorgaten in rekening te nemen, is er een correctiefactor in de vorm van een penalisatietemperatuur T_p toegevoegd.

In de literatuur bestaan er vele verschillende methodes om deze te berekenen en voor sommige boorveldconfiguraties staan deze gedocumenteerd in de ASHRAE-handleiding [14].

Door Bernier en Ahmadfard is in 2018 een nieuwe methode voorgesteld die de noodzaak van een penalisatietemperatuur overbodig maakt door de thermische weerstanden te bepalen op basis van de g-functie [14, 22].

- **Level 3**

Level 3 maakt gebruik van twee thermische pulsen per maand (zowel een gemiddelde- als een piekvermogenpuls). Hoeveel pulsen er uiteindelijk gebruikt worden in Vergelijking (5.6) hangt van de studiekeerperiode af. Deze methode is normaliter nauwkeuriger dan de vorige, maar gaat voor een lange studiekeerperiode veel thermische pulsen in rekening moeten brengen (voor een studiekeerperiode van 20 jaar namelijk $12 \cdot 2 \cdot 20 = 480$ pulsen), hetgeen de rekentijd verhoogt [14]. Typische commerciële programma's zoals EED (zie Sectie 2.2.1) zijn Level 3-methodes [13].

- **Level 4**

De laatste methode is de meest nauwkeurige en maakt gebruik van pulsen op uurbasis. Het idee is hetzelfde als bij de vorige levels al is de complexiteit veel hoger. De laatste versie van EED (versie 4) kan als een Level 4-methode doorgaan [12, 14]. Deze graad van nauwkeurigheid is echter niet nodig voor het opzet van deze thesis.

Hoofdstuk 6

Conclusie voorstudie: methodologie

In dit eerste deel werd aangegeven welke uitdagingen er zijn in deze thesis en werden ook de gebruikte technologieën nader toegelicht. Er is aldus een antwoord gegeven op de eerste onderzoeksvraag uit de inleiding: "Waarom is het vinden van een hybride verwarmings- en koelsysteem een uitdaging?"

In het vorige hoofdstuk werd tenslotte een korte theoretische achtergrond gegeven die noodzakelijk is om de verschillende dimensioneringsalgoritmes te begrijpen. Dit hoofdstuk bouwt verder op al deze zaken en gaat op basis van de eerste inzichten uit de casestudies van Hoofdstuk 4 een verdere methodologie voorop stellen.

Concreet is het onderwerp van deze thesis dus:

Ontwikkel een methode en algoritme om, gegeven een set van technologieën, een economisch optimaal hybride verwarming- en koelsysteem te bekomen met inbegrip van regeneratie van het boorveld.

Vanuit de inleiding resten er nog twee vragen

- Hoe kan een methode ontwikkeld worden om een optimaal hybride systeem te vinden?
- Zijn er leerrijke resultaten die getrokken kunnen worden uit deze methode indien ze wordt toegepast op enkele concrete gevallen.

Om deze vragen te kunnen beantwoorden, zijn enkele zaken van belang

- Er dient een geschikt dimensioneringsalgoritme te worden gekozen dat in staat is om snel en nauwkeurig het veld te dimensioneren. Het algoritme moet ook kunnen rekening houden met regeneratie.
- Er dient een dieper begrip te worden gebouwd van hoe de belasting precies de grootte van het boorveld beïnvloedt, alvorens een algoritme kan worden opgesteld.

-
- Er dient een optimale keuze te worden gemaakt van de verschillende externe technologieën die naast het boorveld zullen worden gebruikt. De gebruikte technologieën staan vermeld in Sectie 2.1.
 - Er zal gekeken worden naar de invloed van verschillende parameters zoals het al dan niet in rekening brengen van regeneratie, kostprijzen etc.
 - Voor de kostprijs wordt een sommatie gemaakt van de werkingskosten en investeringskosten voor een simulatieperiode van 20 jaar. Hiervoor wordt de tijdswaarde van geld (het gegeven dat een euro vandaag niet evenveel waard is als diezelfde euro morgen) niet in rekening gebracht en worden werkingskosten constant verondersteld (i.e. er is geen jaarlijkse stijging van de onderhouds- en energiekosten in rekening gebracht) [20].

Deel twee van deze thesis behandelt de tweede onderzoeksvraag en bespreekt de ontwikkeling van de optimalisatiemethode en het algoritme. In deel drie wordt de derde vraag besproken door terug te komen op de casestudies, maar nu aan de hand van het algoritme ontwikkeld in het volgende deel.

Deel II

Ontwikkelen van de optimalisatiemethode

Ontwikkelen van de optimalisatiemethode

“Linear programming is used to allocate resources, plan production, schedule workers, plan investment portfolios and formulate marketing (and military) strategies. The versatility and economic impact of linear programming in today’s industrial world is truly awesome.”

— Eugene Lawler (1980), prof. informatica, Universiteit van Californië

In dit tweede deel staat de ontwikkeling van de optimalisatie met de bijhorende redenering centraal. In Hoofdstuk 7 staan de verschillende gebruikte algoritmes voor de optimalisatie alsook de validatie ervan centraal. In Hoofdstuk 8 wordt er diep ingegaan op hoe belasting de grootte van een veld kan beïnvloeden en hoe er verzekerd kan worden dat een bepaalde reductie positief is voor het veld. Hoofdstuk 9 beschrijft de ontwikkeling van het lineaire programma dat uiteindelijk de keuze gaat maken welk hybride systeem een optimale kost gaat voortbrengen.

Dit deel zal een antwoord geven op de vraag: *Hoe kan op een inzichtelijke wijze een methode ontwikkeld worden om een economisch optimaal hybride systeem te vinden?*

Hoofdstuk 7

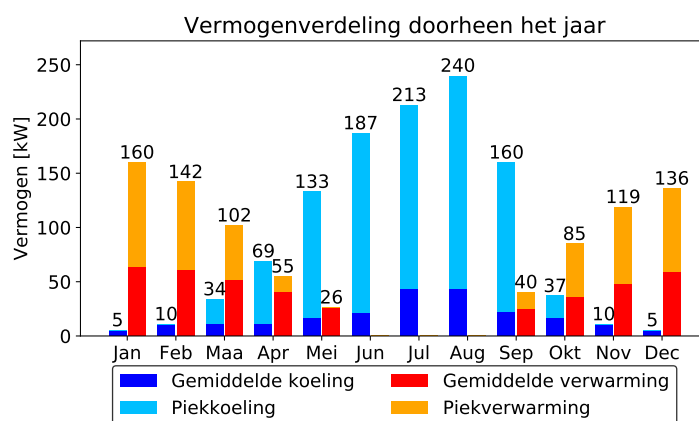
Opstellen en valideren van het dimensioneringsalgoritme

In deze thesis is geopteerd om twee verschillende dimensioneringsmethodes te gebruiken.

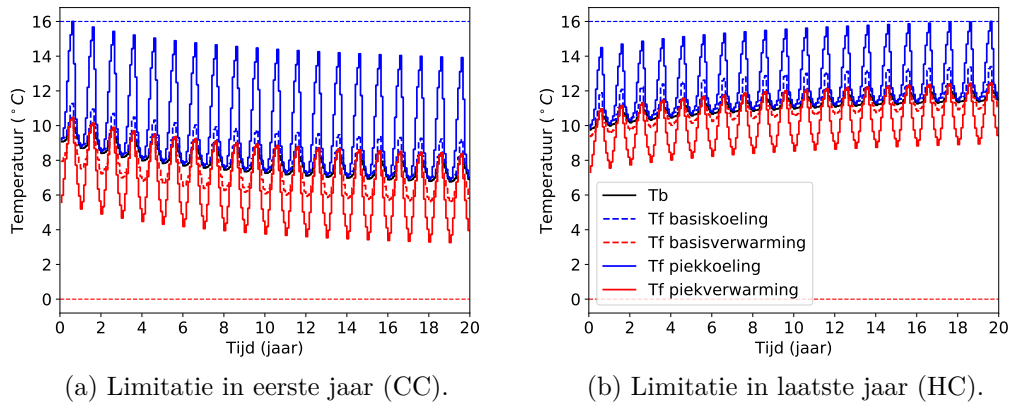
De ene methode is bedoeld om de effecten van regeneratie in rekening te brengen en wordt beschreven in Sectie 7.1. Dit is een globalere methode, die minder nauwkeurig is en werkt op basis van een combinatie van een dimensionering in het eerste en het laatste werkingsjaar van de studieperiode.

Een andere en meer nauwkeurige methode gaat gebruikt worden om te bepalen welke reductiemogelijkheden voor het veld er zijn. Deze dimensionering staat beschreven in Sectie 7.2.

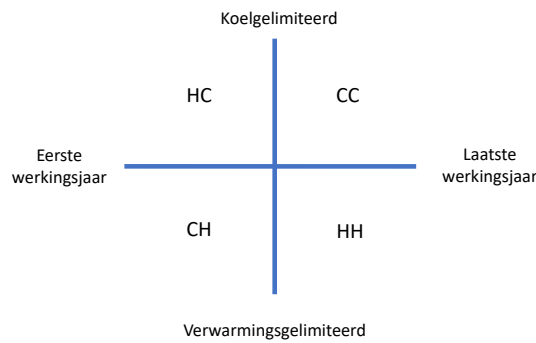
Beide methodes krijgen een belastingsprofiel van het boorveld als input en zullen op basis daarvan (en op basis van de grondparameters) het veld dimensioneren. De manier waarop ze dit doen, verschilt echter. Een voorbeeld van een belastingsprofiel voor een koelvraaggedomineerd geval is te vinden in Figuur 7.1.



Figuur 7.1: Voorbeeld van een belastingsprofiel van het boorveld.



Figuur 7.2: Grafische weergave van het temperatuursverloop in de ondergrond voor zowel een limitatie in het eerste jaar als het laatste jaar. De basisverwarming en -koeling slaat op de temperatuur die bekomen wordt door de basisbelasting aan te leggen.



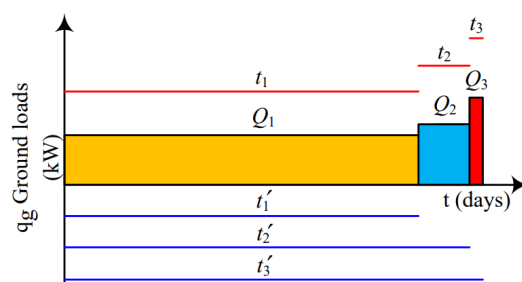
Figuur 7.3: De vier mogelijk kwadranten waarin een boorveld zich kan bevinden.

Tenslotte worden beide methodes gevalideerd door middel van EED en Modelica in Sectie 7.3.

7.1 Samengestelde dimensionering

Een veld kan in zowel het eerste jaar als in het laatste werkingsjaar zijn kritieke temperatuur bereiken en dit zowel aan de warme en koude zijde. Dit is te zien in Figuur 7.2. Het boorveld leent zich er aldus toe om zich te laten categoriseren in vier kwadranten. Deze categorisatie is een handige voorstelling die in latere hoofdstukken nog aan bod zal komen. Ze is weergegeven in Figuur 7.3.

Een veld kan zowel koel- als warmtevraaggedomineerd zijn en dus over de jaren heen respectievelijk de bodem opwarmen of afkoelen. Daarnaast kan een veld



Figuur 7.4: Grafische weergave van de pulsen voor een dimensionering op het laatste werkingsjaar [13].

ook door zowel de maximale als de minimale temperatuur begrensd worden (koelvraaggelimiteerd/warmtevraaggelimiteerd). Indien een veld koelvraaggelimiteerd en koelvraaggedomineerd is, bevindt de limitatie zich in het laatste werkingsjaar (zie ook Figuur 7.2(a)). Figuur 7.2(b) is een voorbeeld van een limitatie door koeling in een warmtevraaggedomineerd veld en dus treedt de kritieke temperatuur in het eerste jaar op.

Deze vier kwadranten hebben allebei twee letters waarbij de eerste letter staat voor de dominantie van het veld en de tweede voor de limitatie van het veld.

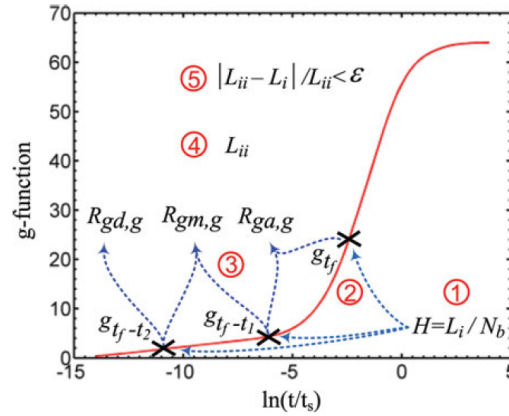
Om de finale lengte te kennen, wordt voor een limitatie in elk van deze vier kwadranten de lengte bepaald. De uiteindelijke lengte kan dan gevonden worden door de grootste van al deze dimensioneringen te nemen. De dimensionering voor zowel het laatste (Sectie 7.1.1) als het eerste werkingsjaar (Sectie 7.1.2) staan hieronder uitgelegd. Sectie 7.1.3 toont de grafische voorstelling van het gehele dimensioneringsalgoritme.

7.1.1 Laatste werkingsjaar

Om de benodigde boorlengte voor het laatste werkingsjaar te bepalen (dus de situaties CC en HH) is in deze thesis gekozen voor een door Bernier en Ahmadfard aangepaste versie van het ASHRAE-algoritme. Zoals in Sectie 5 staat beschreven, maakt deze methode gebruik van 3 thermische pulsen en zijn de thermische weerstanden bepaald op basis van de g-functie. Het belastingsprofiel van Figuur 7.1 wordt dus gereduceerd tot drie pulsen, die grafisch kunnen worden voorgesteld zoals in Figuur 7.4. Hier is Q_3 het grootste piekvermogen, Q_2 de gemiddelde maandbelasting in die maand en Q_1 een jaarlijks gemiddeld vermogen. Dit jaarlijks vermogen wordt bekomen door de energetische (on)balans (het verschil tussen de basisbelasting van verwarming en koeling) in een gemiddeld jaarvermogen te gieten.

Vergelijking (5.6) kan herschreven worden als

$$L = \frac{q_y R_{y,g} + q_m R_{m,g} + q_h R_{d,g} + q_h R_b^*}{T_m - T_g} \quad (7.1)$$



Figuur 7.5: Grafische weergave van de bepaling van de thermische weerstanden [22].

waar het subscript g toegevoegd is om duidelijk te maken dat het om weerstanden gaat die berekend zijn op basis van de g -functies. De thermische weerstanden kunnen dan berekend worden als volgt¹

$$\begin{aligned} R_{y,g} &= [g(t_f) - g(t_f - t'_1)] / (2\pi k_s) \\ R_{m,g} &= [g(t_f - t'_1) - g(t_f - t'_2)] / (2\pi k_s) \\ R_{d,g} &= g(t_f - t'_2) / (2\pi k_s) \end{aligned}$$

waar $g(t)$ staat voor de g -functie geëvalueerd op tijdstip t en $t_f = t_y + t_m + t_h$, $t'_1 = t_y$ en $t'_2 = t_y + t_m$ met t_y de duur van de jaarlijkse puls (hier 20 jaar omdat dit de lengte van de studieperiode is), t_m 1 maand en t_h 6 uur en k_s de thermische conductiviteit van de ondergrond [14, 22]. Grafisch kan dit voorgesteld worden door middel van Figuur 7.5. Op deze manier kan Vergelijking (7.1) voor het specifieke geval van Figuur 7.4 herschreven worden als [13]

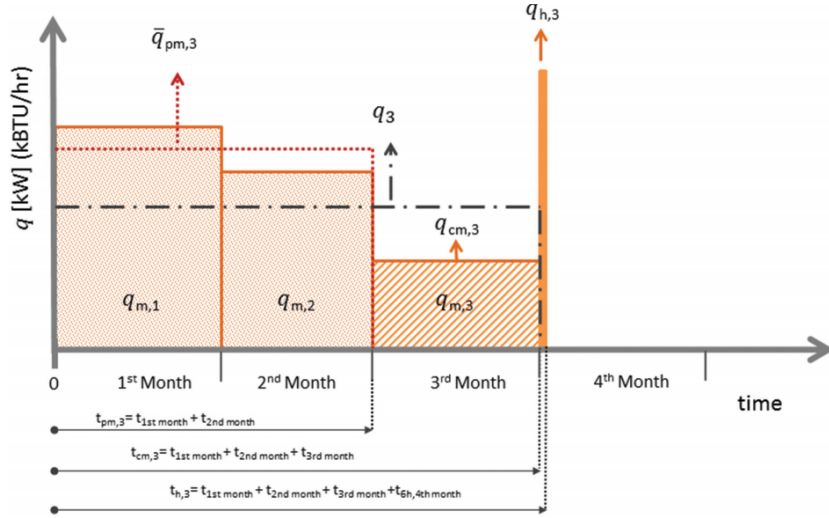
$$L = \frac{1}{2\pi k_s} \frac{Q_1[g(t_y + t_m + t_h) - g(t_m + t_h)] + Q_2[g(t_m + t_h) - g(t_h)] + Q_3[g(t_h) + R_b^*]}{T_m - T_g}$$

Het iteratief oplossen van deze vergelijking geeft dan de benodigde boorgat lengte L .

7.1.2 Eerste werkingsjaar

Voor de dimensionering in het eerste werkingsjaar (dus voor gevallen HC en CH) wordt gebruik gemaakt van de methode beschreven door Monzó en Bernier [34]. In de geciteerde paper wordt echter nog gewerkt met een penalisatietemperatuur. Het is echter mogelijk, zoals in de subsectie hierboven staat beschreven, deze te laten

¹ $R_{d,g}$ is een verwarrend notatie van een weerstand die betrekking heeft op een piekvermogen van enkele uren. $R_{h,g}$ zou aldus duidelijk zijn geweest, maar dit komt niet voor in de literatuur, vandaar dat voor deze notatie is gekozen.



Figuur 7.6: Grafische weergave van de dimensionering voor het eerste werkingsjaar (hier voor $n = 3$) [34].

vallen indien de thermische weerstanden berekend worden op basis van de g-functie. Indien deze aanpassing wordt doorgevoerd, kan een vergelijking bekomen worden die de boorgat lengte voor maand i L_i berekent.

$$L_i = \frac{q_{h,i}R_b^* + q_{h,i}R_h + q_{cm,i}R_{cm} + \bar{q}_{pm,i}R_{pm,i}}{T_m - T_g} \quad (7.2)$$

Ook deze methode gaat het belastingsdiagram van Figuur 7.1 omvormen naar bepaalde thermische pulsen. In Vergelijking (7.2) is $q_{h,i}$ de piekpuls in maand i per meter, $q_{cm,i}$ het gemiddelde maandvermogen in de huidige maand i per meter, R_{cm} de maandelijkse thermische weerstand en $R_{pm,i}$ de thermische weerstand horende bij de gemiddelde maandbelasting $\bar{q}_{pm,i}$ per meter tot aan maand i (merk op dat $\bar{q}_{pm,1} = 0$) [34]. Grafisch is dit weergegeven in Figuur 7.6.

De thermische weerstanden kunnen berekend worden voor het geval van Figuur 7.6 als volgt

$$\begin{aligned} R_{pm,3} &= [g(t_{h,3} - 0) - g(t_{h,3} - t_{pm,3})]/(2\pi k_s) \\ R_{cm,3} &= [g(t_{h,3} - t_{pm,3}) - g(t_{h,3} - t_{cm,3})]/(2\pi k_s) \\ R_{h,3} &= g(t_{h,3} - t_{cm,3})/(2\pi k_s) \end{aligned}$$

Of voor het algemeen in maand i

$$\begin{aligned} R_{pm,i} &= [g(i \cdot t_m + t_h) - g(t_m + t_h)]/(2\pi k_s) \\ R_{cm,i} &= [g(t_m + t_h) - g(t_h)]/(2\pi k_s) \\ R_{h,i} &= g(t_h)/(2\pi k_s) \end{aligned}$$

met t_m en t_h gedefinieerd als de tijdsduur van respectievelijk de maand en het piekvermogen. Hieruit volgt dat $R_{cm,i}$ en $R_{h,i}$ constant blijven bij de verschillende

maanden en enkel $R_{pm,i}$ varieert. Om de benodigde lengte in het eerste werkingsjaar te bepalen, wordt voor elke maand $i \in [1, 12]$ met zowel het piekvermogen van koeling als verwarming de lengte iteratief berekend [34]. Het is echter niet nodig om 12 lengtes te bepalen. Door te redeneren naar analogie met de methode van Bernier, kan gesteld worden dat de limiterende factor in het eerste werkingsjaar de maand gaat zijn met het hoogste (piek)vermogen aan verwarming of koeling om alle kwadranten af te toetsen. Door die twee maanden te controleren, kan de minimale lengte gevonden worden voor het eerste werkingsjaar.

7.1.3 Combinatie van eerste en laatste werkingsjaar

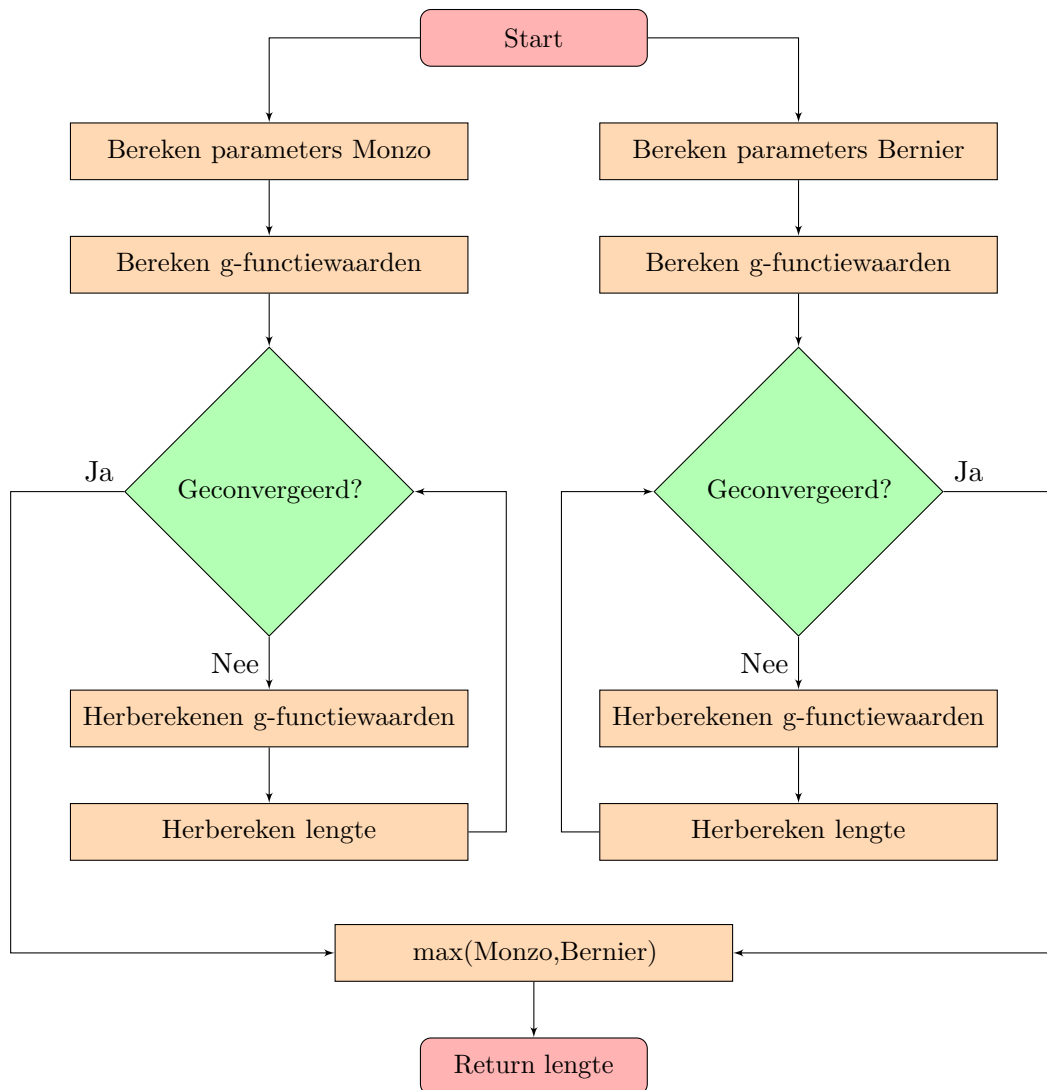
In Figuur 7.7 is een schematische weergave te zien van de dimensioneringsmethode die van de hierboven besproken methodes gebruik maakt. Voor het convergentie-criterium van de iteratie werd gebruik gemaakt van een thresholdwaarde van 10cm tussen de oude en de nieuwe berekende lengte. Merk echter op dat deze flowchart moet doorlopen worden voor zowel een limitatie door koeling als een limitatie door verwarming. De grootste lengte van beide is dan de gedimensioneerde lengte.

Doordat deze dimensionering het belastingsprofiel vereenvoudigt en rechtstreeks gebruik maakt van de onbalans (Sectie 7.1.1), is deze aanpak uitermate geschikt om de effecten van regeneratie in rekening te brengen, daar door in te spelen op de onbalans regeneratie het veld meer gaat balanceren (Sectie 3). Hoe dit concreet gebeurt, staat beschreven in Sectie 8.1.2.

Deze methode is potentieel minder nauwkeurig omdat die de verzwegen premisse heeft dat de limiterende maand dezelfde maand is als de maand met het hoogste piekvermogen. Veelal is dit het geval, al zijn er voorbeelden zoals in Figuur 7.8 te vinden waarin dit niet zo is. Uit de figuur blijkt dat maand j het hoogste piekvermogen heeft, maar de temperatuur gaat waarschijnlijk lager zijn dan in maand i. Dit is omdat de thermische weerstand $R_{m,g}$, berekend uit de g-functiewaarden, groter is dan de effectieve boorgatweerstand R_b^* . Als dus de basisbelasting van een maand met $1kW$ (of $730kWh$ in energietermen) stijgt, heeft dit een groter effect op de uiteindelijke temperatuur dan een stijging van $1kW$ in piekvermogen. Het is dus mogelijk dat voor een bepaalde basisvermogen/piekvermogen-verhouding de limiterende maand i is en niet j.

7.2 Nauwkeurige dimensionering

De vorige methode is geschikt om de grootte van het veld te berekenen, maar geeft onvoldoende precisie over in welke maand er iets moet veranderen als het boorveld kleiner moet worden. Dit komt omdat zowel de methode van Bernier als die van Monzo de gegeven belasting reduceren tot slechts enkele thermische pulsen. Hiermee gaat cruciale informatie over het belastings- en temperatuursprofiel verloren, informatie die nodig is om het veld optimaal te reduceren (zie ook Hoofdstuk 8). In deze

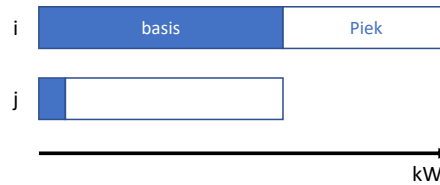


Figuur 7.7: Schematische weergave van de dimensionering op basis van Bernier en Monzo voor verwarming/koeling.

sectie staat daarom een methode beschreven die wel van de volledige belastingsinformatie gebruik maakt.

Deze aanpak maakt rechtstreeks gebruik van Vergelijking (5.4) van de temporele superpositie. Voor de eenvoud is de formule hieronder hernomen, waarin de q_i 's zijn vervangen door Q_i 's om aan te geven dat de belasting nu niet meer in $[kW/m]$ maar in $[kW]$ staat.

$$T_b(t_n) = T_g - \sum_{i=1}^n \frac{(Q_i - Q_{i-1})}{2\pi k_s L} g\left(\frac{t_n - t_{i-1}}{t_s}, \frac{r_b}{H}, \frac{B}{H}\right) \quad (7.3)$$



Figuur 7.8: Voorbeeld waarin het algoritme het verkeerde resultaat zou aangeven.

Door deze formule te gebruiken (waarin de Q_i 's de maandelijkse belastingen zijn), kan de boorwandtemperatuur in elke maand bekomen worden. Het is ook mogelijk om Vergelijking (7.3) te herschrijven als een matrixproduct. Dit kan als volgt

$$T_b(t_n) = T_g - \frac{1}{2\pi k_s L} [Q_0 \quad Q_1 \quad \dots \quad Q_i \quad \dots \quad Q_n] \cdot \begin{bmatrix} g(t_0) \\ g(t_1) - g(t_0) \\ \vdots \\ g(t_i) - g(t_{i-1}) \\ \vdots \\ g(t_n) - g(t_{n-1}) \end{bmatrix} \quad (7.4)$$

De fluïdumtemperatuur volgt dan uit de betrekking uit Sectie 5.1.2

$$T_f(t) = T_b(t) - \frac{(R_b^* + g(t_h))Q_p(t)}{L} \quad (7.5)$$

Waarin $Q_p(t)$ het piekvermogen in de maand is waarin de vloeistoftemperatuur wordt berekend en $g(t_h)$ de g -functiewaarde voor de piek². Deze piekvermogens moeten niet mee worden genomen in de berekening van de boorwandtemperatuur, omdat hun duur te klein is om effectief invloed te hebben op de lange termijn [21]. Dit gebeurt zowel voor de piekvermogens van de koeling als van de verwarming.

Het is verder niet nodig voor elke maand in de periode van 20 jaar de fluïdumtemperatuur te berekenen. Zoals blijkt uit de vier kwadranten van Figuur 7.3, kan het veld enkel in het eerste of het laatste jaar gelimiteerd zijn. Een controle op deze plaatsen, voor zowel koeling als verwarming, is toereikend. Er worden aldus maar 48 temperatuurswaarden geëvalueerd (2 jaren, met 12 maanden voor zowel koeling als verwarming) om de vier kwadranten te controleren. Voor elk van deze kwadranten wordt de temperatuur gekozen die het dichtst bij de limitatie ligt en op basis daarvan

²Het minteken in Vergelijking (7.5) is een gevolg van de gebruikte conventie dat Q_p positief is als er warmte aan de ondergrond wordt afgegeven.

wordt een benodigde lengte berekend. De finale lengte is zoals voorheen de maximale lengte van deze vier kwadranten.

De lengte in een bepaald kwadrant kan bekomen worden door Vergelijkingen (7.3) en (7.5) te herschrijven als

$$L = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{Q_i(g(t_i) - g(t_{i-1}))}{2\pi k_s}}{T_g - T_{lim}} \quad (7.6)$$

waarin T_g de grondtemperatuur op oneindig is en n de maand die in een kwadrant de temperatuur heeft die het dichtstbij de temperatuurslimiet T_{lim} zit.

In wezen dimensioneert deze methode op dezelfde manier als de bovenstaande -beide dimensioneren in alle vier de kwadranten en nemen daarvan de maximale lengte- maar het cruciale verschil zit in het feit dat deze methode nauwkeuriger is, omdat ze rechtstreeks van het belastingsprofiel gebruik maakt en niet van afgeleide thermische pulsen. Deze methode zou met het profiel van Figuur 7.8 wel maand i als limiterend nemen, omdat deze methode rechtstreeks naar de temperaturen kijkt.

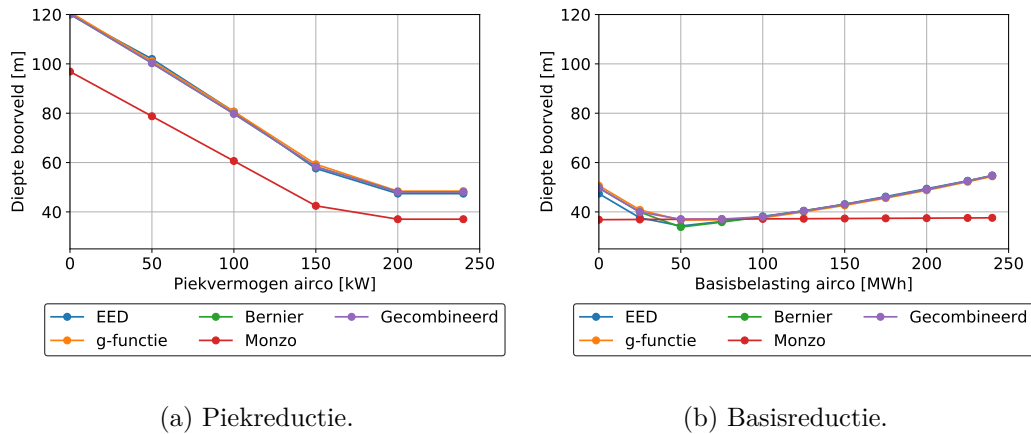
7.3 Validatie

De validatie van de beschreven methodes gebeurt aan de hand van EED en Modelica met de getalwaarden uit de cases van Sectie 4. De velden worden voor de verschillende gevallen gedimensioneerd met zowel EED als met de hierboven beschreven algoritmes. De resultaten hiervan zijn te vinden in Figuur 7.9 voor de koelvraaggedomineerde en Figuur 7.10 voor de warmtevraaggedomineerde case.

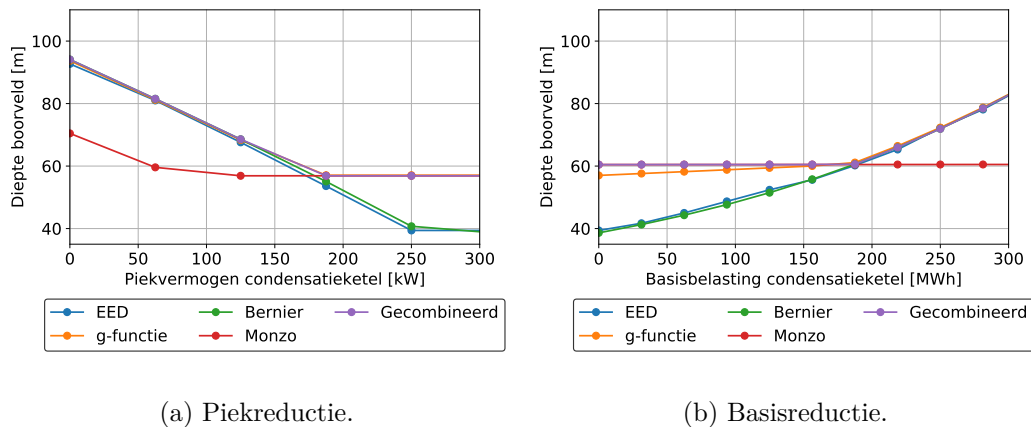
Er vallen enkele zaken op uit deze validatie.

- In het warmtevraaggedomineerde geval (Figuur 7.10) is er een duidelijk verschil te zien tussen enerzijds de dimensionering op basis van EED en Bernier, en anderzijds deze op basis van Monzo en de g -functies. Dit komt omdat vanaf het moment dat de curves uit elkaar gaan (Figuur 7.10(a)) het veld van kwadrant HH naar HC gaat en dus in het eerste jaar gelimiteerd is. Voor Figuur 7.10(b) begint het veld in een HC-toestand en gaat deze naar een CC. Zowel de gecombineerde dimensionering alsook de g -functies geven hier een correct resultaat (cf. Tabel 7.1).
- Bij Figuur 7.9(a) ligt de dimensionering van Monzo onder de andere lijnen. Dit is omdat hier het veld in kwadrant CC zit en omdat het veld jaar na jaar opwarmt, het veld in het laatste jaar groter moet zijn dan in het eerste om onder de maximumtemperatuur te blijven.

In een tweede validatie werd het gedimensioneerde veld ingebracht in Modelica voor een dynamische simulatie van de vloeistoftemperatuur. Dit werd gedaan voor



Figuur 7.9: Validatie van de verschillende boorvelddieptes voor verschillende piekvermogens en basisbelasting voor het koelvraagdomeerde geval.



Figuur 7.10: Validatie van de verschillende boorvelddieptes voor verschillende piekvermogens en basisbelasting voor het warmtevraagdomeerde geval.

verschillende massadebiet, daar het massadebiet een invloed heeft op de fluidumtemperatuur. De resultaten van deze oefening zijn weergegeven in Tabel 7.1. Voor de weergegeven cijfers werd telkens gebruik gemaakt van een massadebiet van 22kg/s .

Het valt op dat de temperaturen zeer dicht aanleunen bij de opgelegde temperatuurgrenzen van 0°C en 16°C . Het voorlaatste geval echter is er een waarbij de maximumtemperatuur sterk overschreden wordt. Dit is omdat het veld zich hier in kwadrant HC bevindt, met een temperatuurslimitatie in het eerste jaar en niet het laatste³. Dit gegeven wijst er inderdaad op dat louter dimensioneren op basis van het laatste jaar niet toereikend is en dat de toevoeging van een dimensionering op basis van het eerste werkingsjaar onontbeerlijk is. Zowel de gecombineerde methode

³Voor het laatste jaar is de maximumtemperatuur ook in de buurt van 16°C .

als de methode op basis van de g-functies geven hier wel een correcte lengte weer.

Bestudeerd geval	Kwadrant	Waarde [°C]
koelvraaggedomineerde referentiecasse	CC	16,344
koelvraaggedomineerd 240kW piekvermogen op airco	CC	16,156
warmtevraaggedomineerde referentiecasse	HH	0,402
warmtevraaggedomineerd 360kW basisbelasting op gasketel	CC	16,129
warmtevraaggedomineerd 150kW piekvermogen gasketel	HH	18,815
warmtevraaggedomineerd 150kW piekvermogen gasketel	CH	16,104

Tabel 7.1: Waarden van de temperaturen bekomen met een dynamische simulatie in Modelica.

Hoofdstuk 8

Boorveldreductie

Zoals reeds in de voorstudie duidelijk naar voren kwam, heeft de grootte van het boorveld een groot effect op de totale kostprijs van de installatie. In dit hoofdstuk wordt uitsluitend gekeken naar het boorveld vanuit het perspectief van het boorveld. Hiermee wordt bedoeld dat de grootte van het boorveld (en welke maatregelen deze grootte kunnen beïnvloeden) onafhankelijk is van de externe technologieën. Deze laatste zijn enkel van belang voor de economische haalbaarheid en worden besproken in Hoofdstuk 9.

Dat deze twee problemen ontkoppeld kunnen worden behandeld, kan eenvoudig worden begrepen aan de hand van volgend gedachte-experiment. Stel dat er in twee verschillende landen, twee wooncomplexen zijn die gebruik maken van een boorveld met exact dezelfde warmte- en koelvraag. Indien de grondcondities gelijk zijn, is dit boorveld voor beide landen exact even groot. De maatregelen die in het ene land kunnen genomen worden om het veld te verkleinen (bijvoorbeeld het basisvermogen van de verwarming in het veld met $50kW$ verminderen) gelden aldus ook in het andere land. Echter, indien beide landen een andere gasprijs/investeringskost hebben, zal het misschien voor het ene land voordelig zijn om deze reductie door te voeren en in het andere land niet. Het is duidelijk dat de keuze van externe technologieën een economische keuze is die losgekoppeld kan worden van de mogelijke acties voor een reductie in boorveldgrootte.

Indien deze twee problemen ontkoppeld worden, moeten er enkele regels gevolgd worden in verband met de reductie om zeker te zijn dat het geheel een economisch optimale situatie geeft. De hiervoor ontwikkelde reductieregels zijn het onderwerp van Sectie 8.1. In Sectie 8.2 worden dan op basis van de reductieregels de verschillende reductieopties besproken die een effect hebben op de grootte van het boorveld. In Sectie 8.3 staat tenslotte beschreven hoe de regeneratie van het veld mee in rekening kan worden gebracht.

8.1 Reductieregels

Om ervoor te zorgen dat het geheel van de externe technologieën en het boorveld een economisch optimum bereikt, is het nodig om enkele regels te volgen. Deze regels staan beschreven in Sectie 8.1.2, maar eerst handelt Sectie 8.1.1 over de noodzaak ervan.

8.1.1 Noodzaak van reductieregels

De noodzaak van de regels volgt uit de splitsing van het optimalisatieprobleem in een probleem van het boorveld en een probleem van de externe technologieën. Aangezien het probleem van de externe technologieën lineair is (er wordt namelijk een constante werkingskost en een lineaire investeringscurve verondersteld), kan volgende redenering gemaakt worden, voor elke iteratiestap.

1. Gesteld dat de reductiemaatregelen voor het boorveld zo zijn dat het veld strikt monotoon in grootte daalt,
2. en gesteld dat deze velddeling lineair is met de genomen maatregel,
3. en gesteld dat deze maatregel economisch voordelig is
4. dan volgt uit (1), (2) en (3), dat er geen andere reductie mogelijk is die kostenefficiënter is.

Een bewijs van deze redenering is relatief direct en is grafisch te zien in Figuur 8.1. De externe kost slaat op een extra investeringskost en werkingskost voor een externe technologie. Aangezien zowel werkingskosten als investeringskosten lineair zijn met piekvermogen en basisbelasting, geldt dat

$$f_1(x) = a_1x + b_1 \quad (8.1)$$

waarin x de eenheid van reductie is¹ (hier kW) en a_1 en b_1 constanten. Aangezien er meer behoefte is aan de externe technologie, zal $a_1 > 0$.

Eenzelfde redenering kan gemaakt worden voor het boorveld met een functie

$$f_2(x) = a_2x + b_2 \quad (8.2)$$

met a_2 en b_2 eveneens constanten. Deze functie is lineair door de tweede premisse van hierboven en op basis van de eerste premisse geldt dat $a_2 < 0$.

De totale kostprijs kan dan geschreven worden als een som van beide kosten

$$f_3(x) = (a_1 + a_2)x + b_1 + b_2 \quad (8.3)$$

De te bewijzen stelling kan dan geschreven worden als

$$x_i \in [x_0, x_1] : f_3(x_i) < f_3(x_0) \Rightarrow f_3(x_1) < f_3(x_j), \forall x_j \in [x_0, x_1] \quad (8.4)$$

¹ kW bij een reductie in piekvermogen of kWh bij een reductie in basisbelasting.

Deze stelling kan bewezen worden met een bewijs uit het ongerijmde (ook bewijs door het tegengestelde genoemd). Uit de geldigheid van premisse 3 volgt dat er een x_i bestaat waarvoor geldt dat

$$f_3(x_i) < f_3(x_0) \Rightarrow a_3 < 0 \quad (8.5)$$

Stel nu dat

$$\exists x_j \in [x_0, x_1] : f_3(x_j) < f_3(x_1) \Rightarrow a_3 > 0 \quad (8.6)$$

Vergelijking (8.6) gaat in tegen Vergelijking (8.5). Uit deze stelling volgt het bewijs van Vergelijking (8.4) en de geldigheid² van het argument. Echter, om het argument ook gegrond³ te maken, moeten de premisses (1) en (2) ook kloppen.

Dat de reductie in het boorveld (benaderend) lineair is (premisses (2)), volgt uit Vergelijking (5.6) (hernomen als (8.7))

$$L = \frac{\sum_{i=1}^N q_i R_i + q_h R_b^*}{T_m - (T_g + T_p)} \quad (8.7)$$

Hieruit volgt dat, voor de reductie van een bepaalde q_i , met $R_i = \frac{g(t_i, L)}{2\pi k_s}$

$$\Delta L = \frac{\Delta q g(L + \Delta L)}{2\pi k_s (T_m - (T_g + T_p))} \quad (8.8)$$

$$\frac{\Delta L}{\Delta q} \simeq \frac{g(L) + \frac{dg(L)}{dL} \Delta L}{2\pi k_s (T_m - (T_g + T_p))} \quad (8.9)$$

waarbij in Vergelijking (8.9) gebruik werd gemaakt van een eersteordebenadering. Deze is toegestaan, als ΔL voldoende klein is, hetgeen het geval gaat zijn in het algoritme. Om premisse (1) te garanderen, zijn er bepaalde regels vooropgesteld voor de reductie van het boorveld. Deze zijn het onderwerp van Sectie 8.1.2.

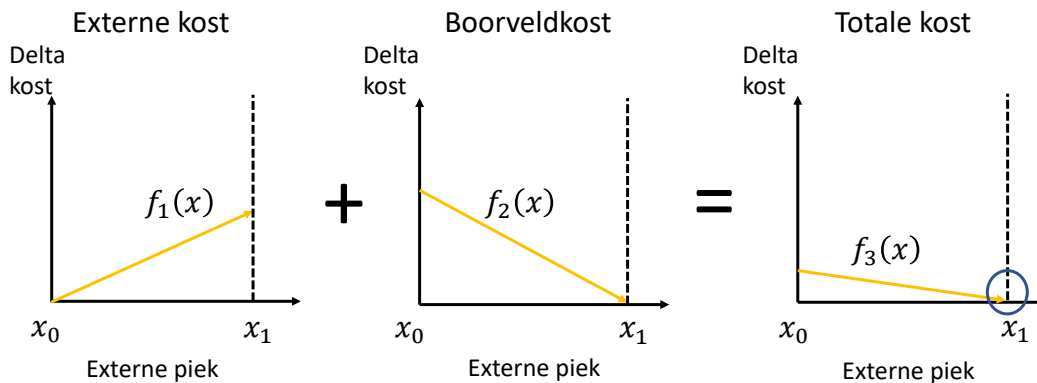
8.1.2 De vier reductieregels

Om er zeker van te zijn dat het veld monotoon in grootte daalt, zijn er vier regels die gevolgd moeten worden. Deze regels zijn hieronder opgelijst en worden nadien een voor een besproken. Op basis van deze regels kunnen dan in Sectie 8.2 de verschillende opties voor reductie besproken worden.

1. Het nettopiekvermogen en de basisbelasting moeten groter of gelijk zijn aan nul.
2. De reductie moet stoppen als een nieuwe maand limiterend is geworden.

²Een argument is valide of geldig als de conclusie automatisch volgt uit de premissen, als de premissen waar zijn [35].

³Een gegrond argument is een argument dat valide is en waarvan bovendien de premisses kloppen [35].



Figuur 8.1: Grafisch bewijs voor de noodzaak van de reductieregels.

3. Van een koelvraaggedomineerd veld mag niet rechtstreeks naar een warmtevraaggedomineerd veld gegaan worden en vice versa.
4. Van een koelvraaggelimiteerd veld mag niet rechtstreeks naar een warmtevraaggelimiteerd veld gegaan worden en vice versa.

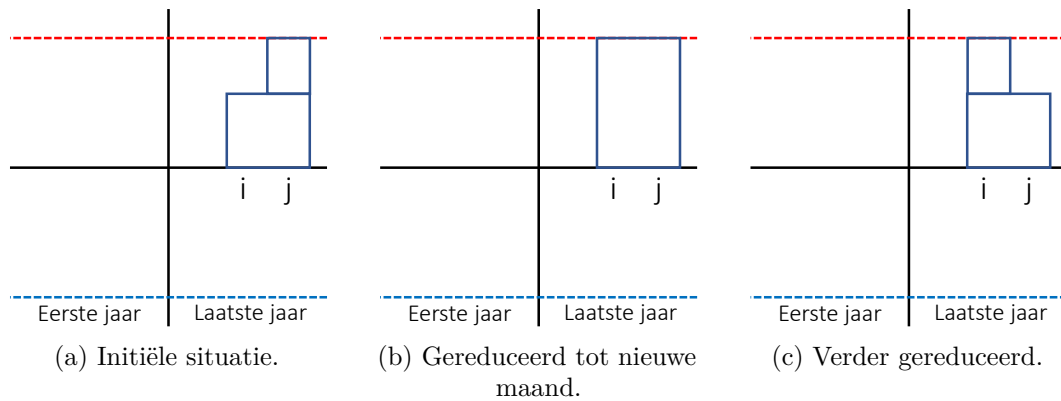
De laatste twee regels kunnen ook samengenomen worden onder de regel "Vanuit een limitatie in één kwadrant mag niet rechtstreeks naar een limitatie in een ander kwadrant gegaan worden". Omwille van didactische redenen, zijn deze twee hier toch gescheiden weergegeven. De noodzaak voor ieder van deze individuele stellingen staat hieronder toegelicht.

Regel 1: het nettopiekvermogen en de basisbelasting moeten groter of gelijk zijn aan nul

Dat het nettopiekvermogen (i.e. het piekvermogen met als referentie het gemiddeld maandvermogen) groter moet zijn dan de basisbelasting en deze basisbelasting op haar beurt steeds groter moet zijn dan (of gelijk aan) 0, heeft te maken met hoe het algoritme werkt. Aangezien zowel piekvermogen koeling als verwarming (en hetzelfde voor basisbelasting) apart wordt ingegeven, is het hebben van negatieve belastingen overbodig. Een negatieve koeling zou een extra verwarming impliceren, hetgeen apart wordt ingegeven.

Regel 2: reductie stopt bij een nieuwe limiterende maand

Deze regel kan het best geïllustreerd worden door middel van Figuur 8.2, waarin de linkerzijde van de figuur het eerste werkingsjaar en de rechterkant het laatste werkingsjaar is.



Figuur 8.2: Illustratie van de noodzaak voor regel 2.

In Figuur 8.2(a) is het veld gelimiteerd door een piekvermogen⁴ in maand j. Een manier om het veld te reduceren is dan door deze piek te verminderen. Dit gebeurt tot figuur 8.2(b) wordt bekomen, waar de maand i nu ook de maximale temperatuur heeft en het veld in twee verschillende maanden gelimiteerd is. Een verdere reductie van piekvermogen in maand j, leidt tot Figuur 8.2(c). De grootte van het veld is echter gelijk gebleven, omdat het veld nu door maand i gelimiteerd is. Omdat de daling van veldgrootte strikt monotoon moet zijn, dient de reductie in deze iteratie te stoppen als maand i limiterend is geworden (i.e. Figuur 8.2(b)).

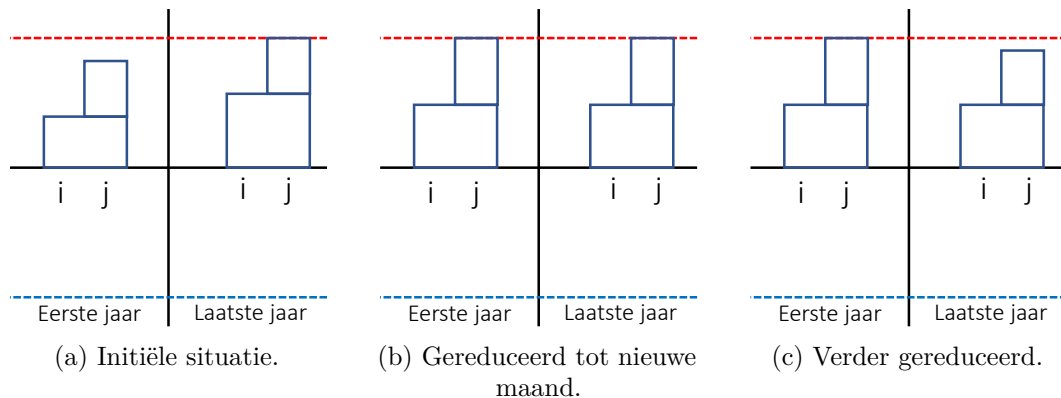
Indien in een volgende iteratie de grootte van dit veld moet verminderen, moeten zowel maand i als j tezamen gereduceerd worden tot een andere maand weer limiterend wordt of een van de drie andere regels van toepassing is.

Regel 3: er mag niet rechtstreeks van onbalans veranderd worden

Deze regel komt neer op een horizontale verplaatsing in het boorveldkwadrant (van koelvraaggedomineerd naar warmtevraaggedomineerd of andersom) en heeft aldus betrekking op de verandering van onbalans. Wat deze regel stelt, is dat niet rechtstreeks van een ongebalanceerd veld naar een andere onbalans mag gegaan worden. Dit is te zien in Figuur 8.3.

In Figuur 8.3(a) is het eerste en laatste werkingsjaar getoond en valt het op dat het veld gelimiteerd is in het laatste jaar. Dit is omdat er een onbalans is, die maakt dat de bodemtemperatuur jaar na jaar stijgt, wat maakt dat de limitatie in het laatste jaar optreedt. Indien de onbalans vermindert, wordt de toestand in Figuur 8.3(b) bekomen, waarin het veld volledig gebalanceerd is en door het ontbreken van een netto temperatuursstijging op jaarbasis is de temperatuurslimiet zowel in het eerste als in het laatste werkingsjaar (alsook in alle jaren daartussen) bereikt. Indien

⁴De redenering gaat ook op met een basisbelasting, maar is dan iets moeilijker grafisch weer te geven (cf. infra).



Figuur 8.3: Illustratie van de noodzaak voor regel 3.

nu de onbalans verder gereduceerd wordt, wordt Figuur 8.3(c) bekomen.

Daar de premisse van de lineariteit moet gelden, zal deze reductie dus stoppen in Figuur 8.3(b), omdat van Figuur 8.3(b) op (c) het veld niet meer in grootte daalt⁵.

In een volgende iteratiestap kan dan wel verder worden gereduceerd naar Figuur 8.3(c) zolang de andere regels niet geschonden worden.

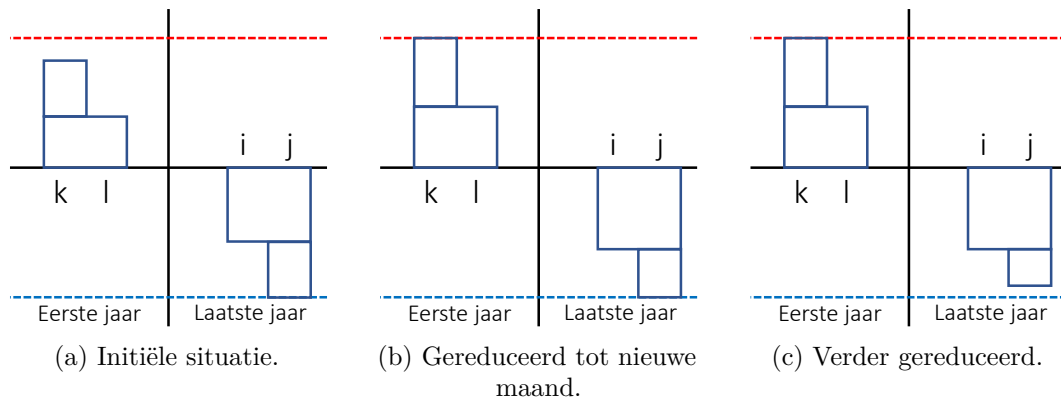
Regel 4: er mag niet rechtstreeks van limitatie veranderd worden

Deze regel leunt nauw aan bij regel 2 en is weergegeven in Figuur 8.4 en geeft eigenlijk weer wat er in de warmtevraaggedomineerde case van Hoofdstuk 4 gebeurt. Het veld is in Figuur 8.4(a) gelimiteerd door de verwarming in het laatste werkingsjaar. Indien in maand j een piekreductie⁶ wordt doorgevoerd, kan het zijn dat het veld gelimiteerd wordt in het eerste jaar door de koeling (Figuur 8.4(b)). Een verdere reductie van maand j zal dan geen effect meer hebben op de grootte van het veld (Figuur 8.4(c)) en daar het veld strikt monotoon moet dalen, dient de reductie in Figuur 8.4(b) te stoppen.

In een volgende iteratiestap kan dan verder maand k en j samen gereduceerd worden om het veld te laten dalen, wederom, de andere regels indachtig.

⁵Indien de onbalansreductie het gevolg is van een daling van de koelvraag in maand j , zal het boorveld van Figuur 8.3(b) op (c) wel verkleinen. Toch is dit in tegenspraak met de tweede premisse van hierboven dat de daling van grootte lineair moet zijn met de genomen maatregel. Van Figuur 8.3(a) op (b) spelen er twee zaken mee in de reductie van het boorveld: de vermindering van onbalans én de reductie van de limiterende maand. Van Figuur 8.3(b) op (c) speelt enkel de reductie van de limiterende maand een rol in de daling van de grootte van het boorveld. De marginale daling van boorveldgrootte verschilt dus in beide gevallen, wat maakt dat het geheel geen lineaire functie is.

⁶De redenering kan ook met een basisreductie worden gemaakt.



Figuur 8.4: Illustratie van de noodzaak voor regel 4.

8.2 Reductieopties

Nu het speelbord van de reductiemogelijkheden is vastgelegd door de vier reductieregels van hierboven, kan er nader ingegaan worden op welke maatregelen er precies kunnen worden genomen om het veld te reduceren en hoe ze met zekerheid deze regels niet overtreden. Het doel van deze sectie is om een set aan mogelijke reducties te krijgen die in overeenstemming zijn met deze regels en die als input kunnen gebruikt worden voor het lineaire programma in Hoofdstuk 9, waar de meest economische van deze mogelijke reducties zal gekozen worden.

In Sectie 8.2.1 worden kort de verschillende mogelijke reductiemaatregelen besproken, waarna in Sectie 8.2.2 en Sectie 8.2.3 de concrete stappenplannen voor al deze reducties voor zowel een zuivere limitatie als voor een gemengde limitatie worden uitgewerkt.

8.2.1 Verschillende opties

Er zijn acht maatregelen die op elk moment in de tijd kunnen genomen worden om de grootte van het boorveld te beïnvloeden. Dat zijn: een stijging of daling van het piekvermogen of de basisbelasting van de warmte- of koelvraag. Niet elk van deze maatregelen is geschikt in een bepaalde toestand van veld en moet dus door het algoritme ook niet in rekening worden gebracht. De mogelijke opties zijn in Tabel 8.1 weergegeven, waarbij de maatregel steeds zou worden uitgevoerd in de limiterende maand. Hierbij staan de vinkjes voor een gunstige maatregel, de kruisjes voor een ongunstige en een - voor een maatregel die noch goed noch slecht is. Uit Tabel 8.1 vallen enkele conclusies te trekken.

- Een reductie van de limiterende component (i.e. koelvraag bij een koelvraagge-limiteerd veld en warmtevraag bij een warmtevraaggedomineerd veld) is altijd gunstig en een stijging van deze component altijd ongunstig.

Toestand	Koelvraag				Warmtevraag			
	Stijging		Daling		Stijging		Daling	
	Piek	Basis	Piek	Basis	Piek	Basis	Piek	Basis
CC	✗	✗	✓	✓	-	✓	-	✗
HC	✗	✗	✓	✓	-	-	-	-
HH	-	✓	-	✗	✗	✗	✓	✓
CH	-	-	-	-	✗	✗	✓	✓

Tabel 8.1: Verschillende reductieopties en hun effect bij bepaalde toestanden. (On-
gunstig: ✗, gunstig: ✓, neutraal: -)

- Indien het veld gelimiteerd is in het laatste werkingsjaar (dit is het geval bij CC en HH, cf. supra) is een basisstijging, die de onbalans vermindert, voordelig. In het geval van een CC is dit een stijging van de basisbelasting van de verwarming. Deze stijging kan ook beschouwd worden als een regeneratie (zie ook Sectie 8.3).
- Indien het veld gelimiteerd is door koeling, dan is de stijging of de reductie van de verwarmingspiek irrelevant voor de grootte van het veld. Een reductie⁷ van de piek kan dan gewoon worden doorgevoerd uit economische redenen (er is bijvoorbeeld een zonnecollector geïnstalleerd die 'gratis' verwarming levert).

De reducties van piekvermogen en basisbelasting worden in de secties hieronder toegelicht. Het laten stijgen van de basisbelasting (i.e. regeneratie) komt aan bod in Sectie 8.3.

8.2.2 Zuivere limitatie

Voor de reductie van het boorveld is het belangrijk om een onderscheid te maken tussen een zuivere limitatie en een gemengde limitatie. Met een zuivere limitatie wordt bedoeld dat het veld slechts door één van de temperatuurslimieten wordt begrensd. Indien het veld gelimiteerd is door de twee temperatuurslimieten, wordt van een gemengde limitatie gesproken.

De reductiemogelijkheden voor een zuivere limitatie zijn een piekreductie, een basisreductie en een piek-basisreductie. Deze staan staan hieronder verder uitgewerkt.

⁷Een stijging van de piek zou in theorie ook mogen, maar gaat in praktijk niet optreden. Het algoritme start namelijk vanuit de situatie waarin de gehele belasting op het boorveld komt. Indien tijdens een welbepaalde iteratie het voordelig blijkt om het piekvermogen te reduceren, zal er nadien geen moment meer komen waarop het voordelig gaat zijn om deze weer te verhogen. De initiële reden waarom een piek gereduceerd is, zal namelijk nog altijd geldig zijn door het lineaire karakter van het probleem.

Piekreductie

De meest eenvoudige reductie van de grootte van een boorveld is de reductie van het piekvermogen in de limiterende maand(en), daar deze reductie geen invloed heeft op de onbalans van het veld en aldus de temperaturen van de andere maanden onveranderd laat. Indien enkele van de limiterende maanden begrensd zijn door de basisbelasting, is deze categorie niet van toepassing, maar moet worden gebruik gemaakt van de piek-basisreductie (Pagina 64). Een flowchart van hoe de piekreductie wordt uitgevoerd met inbegrip van de reductieregels is te vinden in Figuur 8.5.

De eerste stap is de berekening van het temperatuursprofiel in de bodem en de daaruit volgende limiterende maanden. Indien hieruit volgt dat de limiterende maanden uitsluitend beperkt zijn door piekvermogen, wordt de piekreductie geïnitieerd. Indien het mogelijk is een piekreductie door te voeren, rest natuurlijk nog de vraag met hoeveel de piek(en) gereduceerd moet(en) worden. Hiervoor worden er twee reducties gedaan: één ten opzichte van een interne referentie (om de eerste reductieregel niet te overtreden) en één ten opzichte van een externe referentie (voor de tweede regel). Het verschil is weergegeven in Figuur 8.6 en is hieronder nader toegelicht.

Interne referentie De eerste reductieregel stelt dat het nettopiekvermogen altijd groter dan of gelijk moet zijn aan nul. Dit impliceert dat er maar zoveel piekvermogen gereduceerd kan worden tot een van de limiterende maanden geen nettopiekvermogen meer heeft. Dit is weergegeven in Figuur 8.6(a) waarin (in temperatuurstermen) ΔT gereduceerd kan worden tot in maand j de temperatuur van de basisbelasting en de piekbelasting gelijk is. Het veld heeft aldus geen nettopiekvermogen meer in maand j . Het vermogen dat op deze manier gereduceerd kan worden, is te vinden via

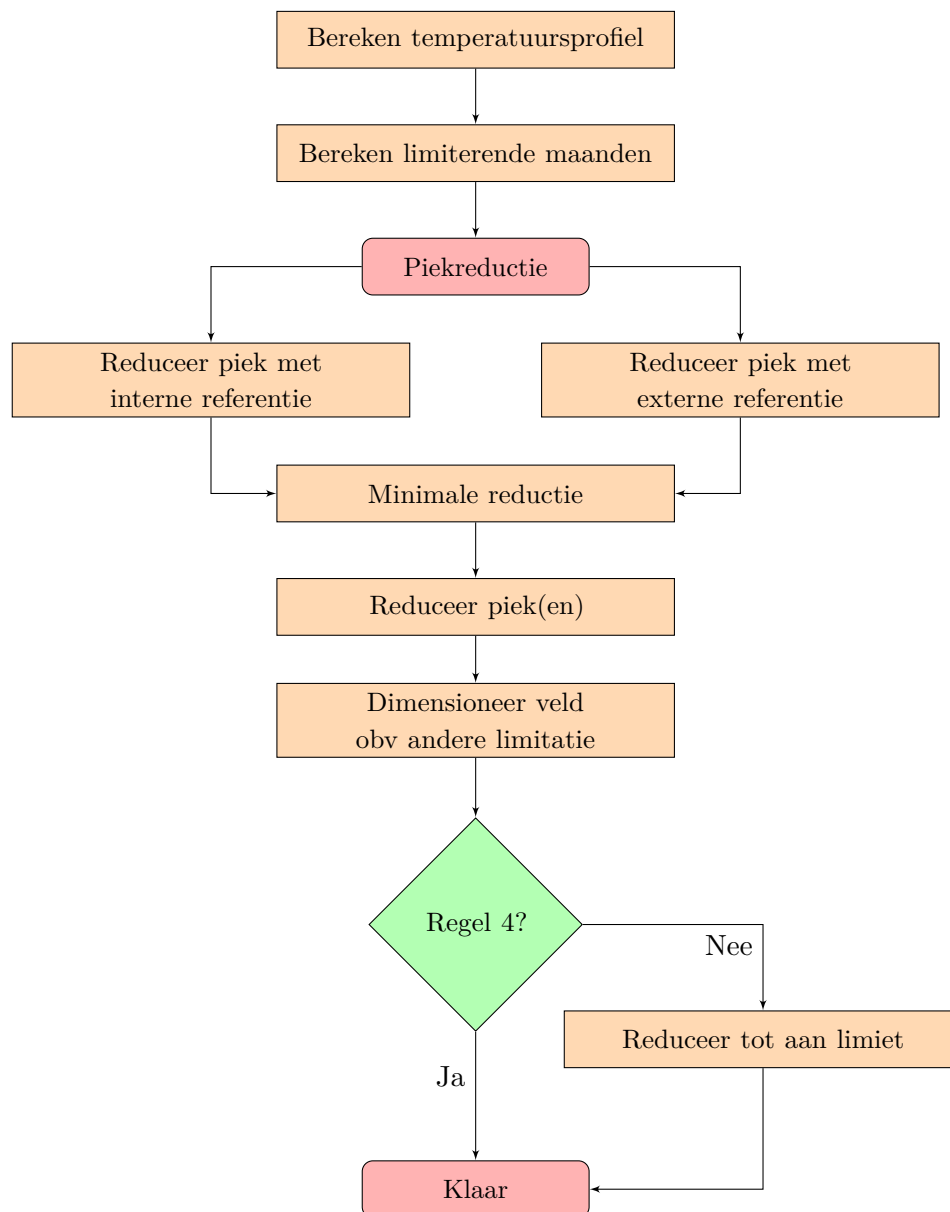
$$\Delta T = \min_i T_{piek,i} - T_{basis,i} \quad (8.10)$$

waarin i een limiterende maand is. Wanneer de ΔT gekend is (en deze volgt uit het berekende temperatuursverloop), kan deze omgerekend worden naar een vermogen. Daar een piekreductie geen invloed heeft op de onbalans, kan het reduceerbaar vermogen gevonden worden door

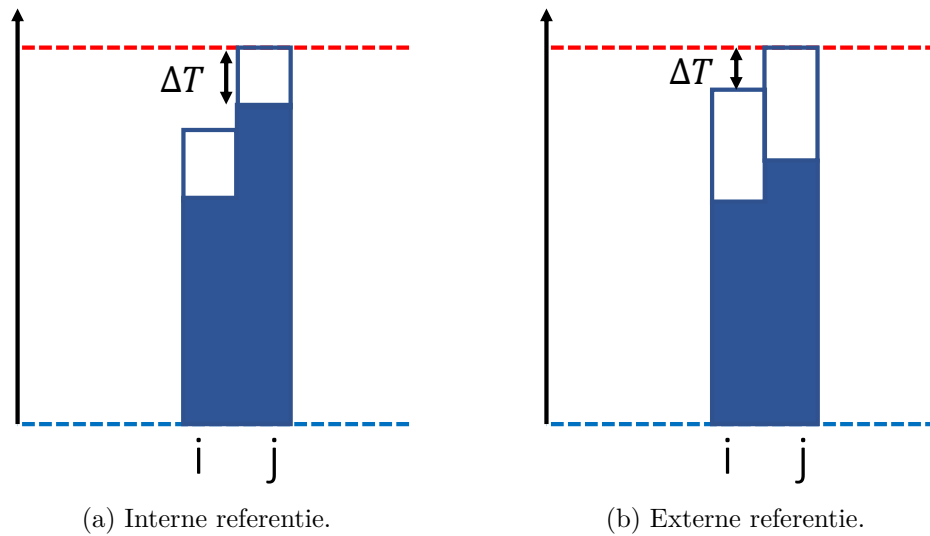
$$\Delta T = \Delta Q \left(\frac{g(t_h)}{2\pi k_s} + R_b^* \right) \quad (8.11)$$

waarin $g(t_h)$ de g -functiewaarde is horende bij de piek.

Externe referentie De externe referentie wordt gebruikt om de tweede reductieregel te controleren, die stelt dat de reductie moet stoppen op het moment dat een andere maand limiterend wordt. Hiervoor wordt er gekeken naar alle niet-limiterende maanden en de maand met een temperatuur die het dichtst bij de limiet aansluit, wordt als referentie genomen. In Figuur 8.6(b) is dit maand i . Aan de hand van de ΔT kan wederom door middel van Vergelijking (8.11) het te reduceren piekvermogen



Figuur 8.5: Flowchart voor de implementatie van de piekreductie.



Figuur 8.6: Verschillende referenties voor piekreductie.

bepaald worden.

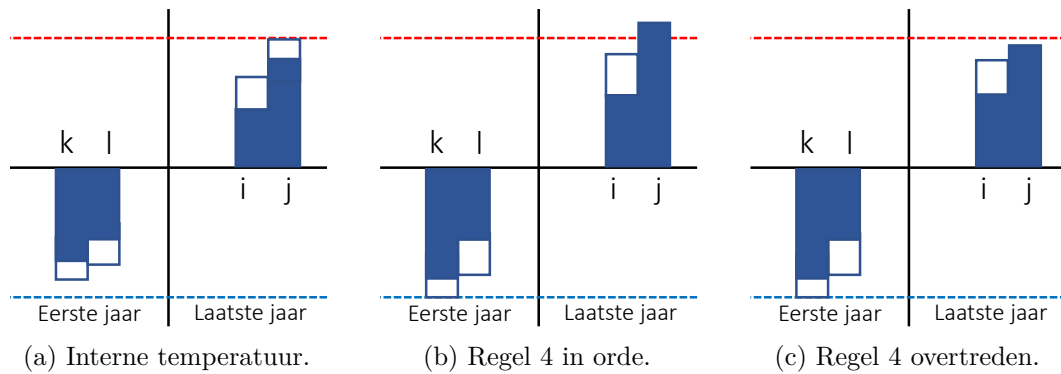
Vervolgens kiest het algoritme de kleinste reductie van de twee uit (i.e. interne of externe referentie), omdat anders een van de twee regels geschonden zou worden. Nu dient er enkel nog op regel 4⁸ te worden gecontroleerd. Grafisch kan dit aan de hand van Figuur 8.7. In Figuur 8.7(a) staat de initiële toestand van het veld weergegeven. Vervolgens wordt de reductie zoals hierboven beschreven staat (in deze figuur met een interne referentie⁹) doorgevoerd en wordt het veld op de andere limitatie gedimensioneerd. In dit geval is dat de verwarming, omdat het veld koelvraaggedomineerd is. Er zijn nu twee opties.

- Ofwel wordt Figuur 8.7(b) bekomen. In dit geval is de temperatuur aan koelzijde groter dan de maximaal toegelaten temperatuur. Dit impliceert dat een veld gedimensioneerd op deze temperatuurslimiet minder streng is dan een limitatie aan de koelzijde. Regel 4 is dus niet overtreden.
- Indien het beeld uit Figuur 8.7(c) bekomen wordt, is regel 4 wel geschonden. Het veld is namelijk nu volledig gelimiteerd door de verwarmingszijde en het punt waarop beide limiterend zijn (zie ook Figuur 8.4(b)) is rechtstreeks overschreden. Dit mag niet en daarom wordt het veld geherdimensioneerd. Dit is te zien in Figuur 8.8(a).

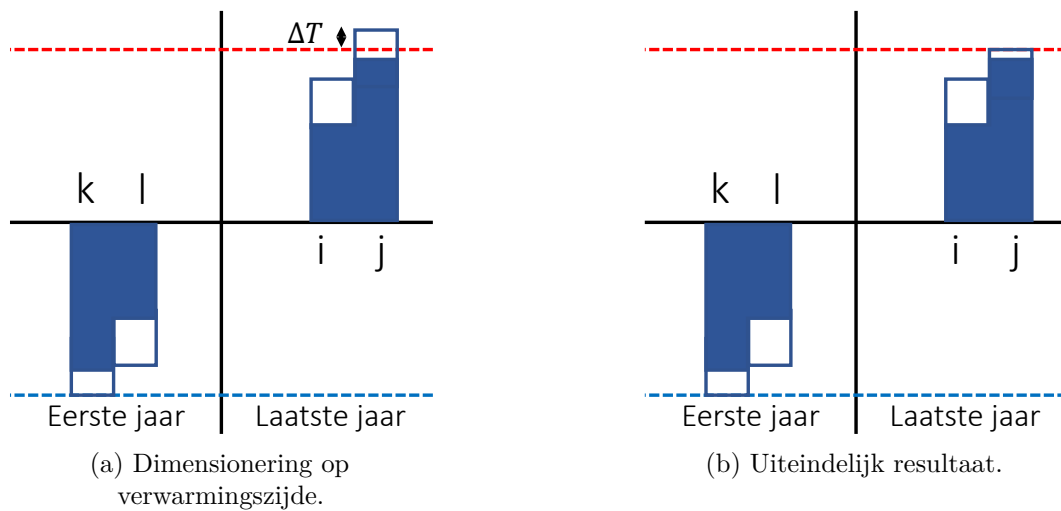
In Figuur 8.8(a) is het temperatuursverloop te zien zonder de reductie van daarnet en nog steeds op de minimumtemperatuur gedimensioneerd. Er is

⁸Regel 4 stelt dat de reductie moet stoppen als de andere temperatuurslimiet bereikt wordt.

⁹Hiermee wordt bedoeld dat de referentietemperatuur ten opzichte van dewelke de ΔT wordt berekend gelegen is in de maand waarvan het vermogen wordt gereduceerd.



Figuur 8.7: Illustratie van de controle van regel 4 voor een reductie in piekvermogen.



Figuur 8.8: Illustratie van de herberekening van de piekreductie.

nu een nieuwe ΔT bepaald. Indien de hoeveelheid piekvermogen, horende bij deze ΔT wordt gereduceerd, wordt Figuur 8.8(b) bekomen. Er wordt dan een veld bekomen dat een gemengde belasting heeft (zie Sectie 8.2.3), in overeenstemming met de reductieregels.

Indien al deze stappen en controles worden gevolgd, kan met zekerheid worden gesteld dat een reductie in piekvermogen in lijn is die vier reductieregels.

Basisreductie

Een basisreductie volgt deels dezelfde logica als een piekreductie, maar is enigszins complexer. Allereerst heeft een basisreductie geen 'interne referentie' zoals dat bij een piekreductie wel het geval is. Er bestaat namelijk geen referentietemperatuur ten opzichte van dewelke de basisbelasting kan worden uitgedrukt. Daarnaast is het gebruik van externe referenties complexer, omdat een reductie in basisbelasting een

effect heeft op de temperatuur van de bodem en dus de andere maanden (waaronder de referentiemaanden) gaat beïnvloeden. Daarnaast moet de keuze gemaakt worden of naast de basisreductie het nettopiekvermogen constant wordt gehouden. Al deze zaken worden aan de hand van de flowchart voor de basisreductie in Figuur 8.9 besproken.

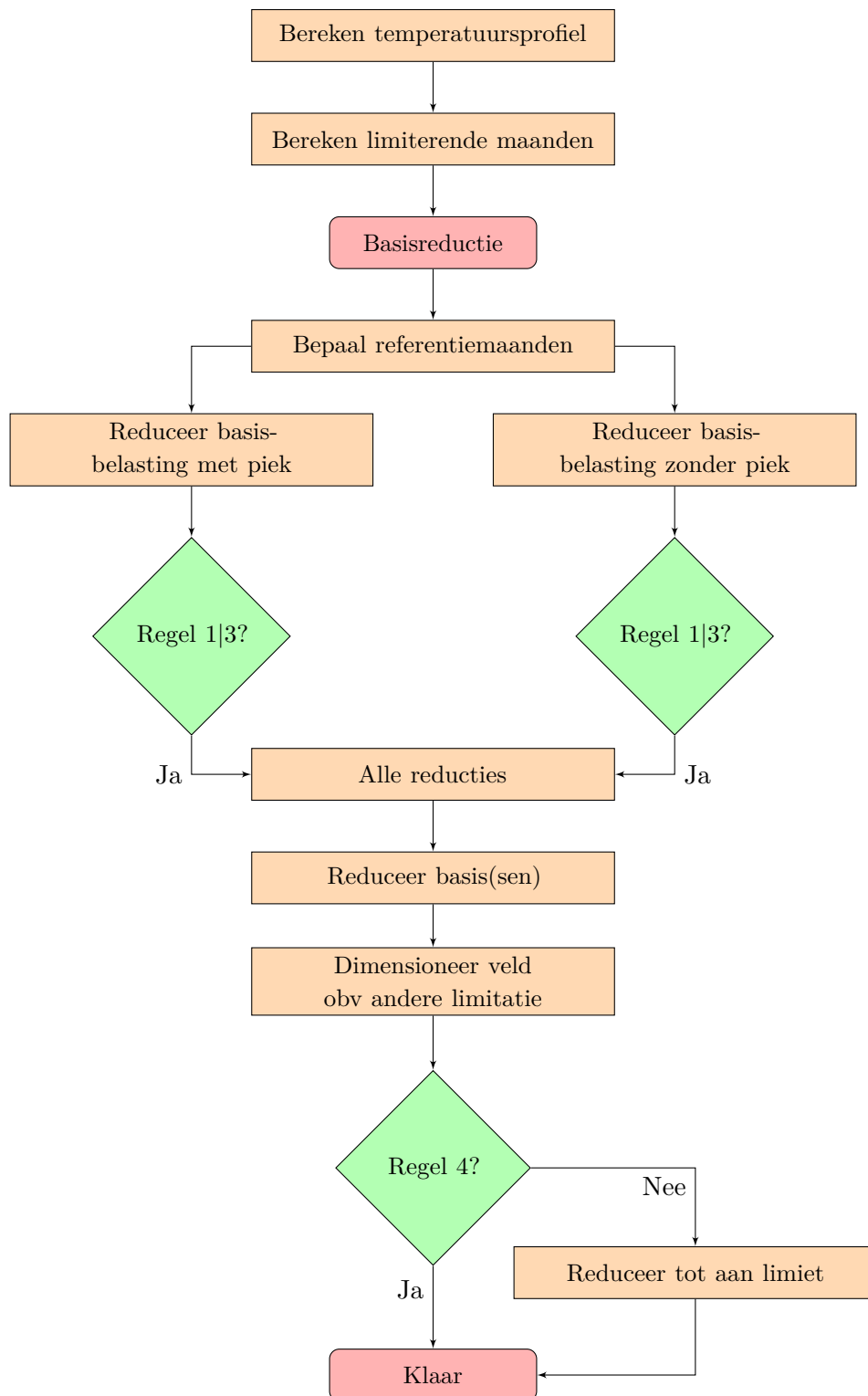
De flowchart start weer met een bepaling van het temperatuursprofiel en de limiterende maanden. Indien blijkt dat alle limiterende maanden zuiver gelimiteerd zijn door basisbelasting¹⁰ kan een basisreductie doorgevoerd worden. Hiervoor bepaalt het algoritme eerst welke maanden als referentie kunnen dienen. Dit is namelijk belangrijk om regel 2 te kunnen volgen. Indien namelijk een maand als referentie wordt gekozen die nadien niet limiterend is, is regel 2 geschonden. De manier waarop een set aan mogelijke referentiemaanden bepaald wordt, is grafisch voorgesteld in Figuur 8.10.

Limitatie in eerste jaar Indien de limitatie zich in het eerste jaar voordoet (kwadranten CH en HC), dan heeft de reductie van basisvermogen in de reductiemaand (red) geen effect op de temperatuur van de vorige maanden (m, n en o). In dat geval kan de maand (voor de reductiemaand) met de hoogste temperatuur worden toegevoegd aan de set van referentiemaanden. In Figuur 8.10(a) is dat maand m. Voor de maanden na de reductiemaand is de situatie complexer. Een reductie van basisvermogen heeft namelijk dan wel een effect op de temperaturen van de andere maanden. Het is belangrijk om te weten dat het effect dat de basisreductie heeft op een referentiemaand kleiner wordt naarmate deze maand verderaf gelegen is. Dit komt omdat het resultaat van de superpositie van de g-functies na lange tijd kleiner gaat zijn. De maand i ondervindt aldus meer temperatuursreductie ten gevolge van een basisdaling in de reductiemaand dan de maand j en j meer dan k etc.

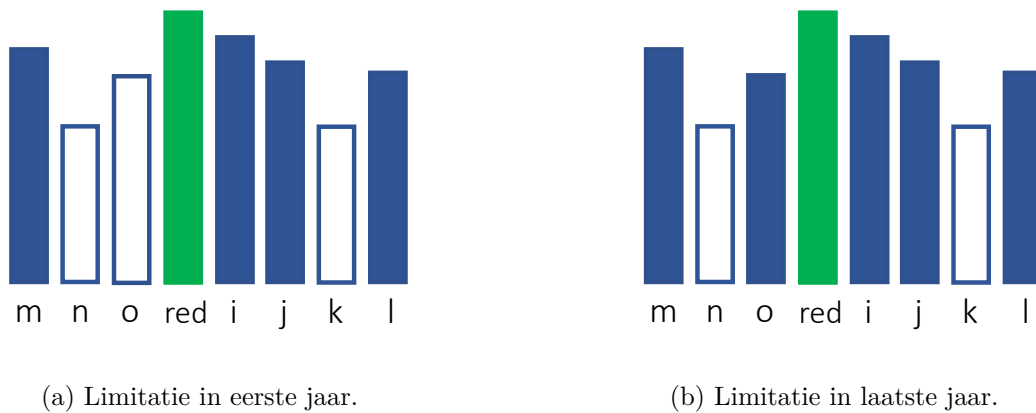
Nu wordt er gekeken naar welke maanden potentieel limiterend kunnen zijn. Hiervoor wordt begonnen bij de meest verafgelegen maand (l in Figuur 8.10(a)). Omdat deze maand het meest verafgelegen is van de reductiemaand, ondervindt deze dus het minste temperatuursdaling. De maanden i en j hebben dan wel een hogere temperatuur, maar zullen evenzeer meer dalen in temperatuur ten gevolge van een basisreductie in de reductiemaand. Omdat a priori niet geweten is welk van deze twee effecten het grootste gaat zijn, bestaat de kans dat maand l limiterend wordt. Dit maakt dat maand l in de set van referentiemaanden moet.

Voor maand k is dit niet het geval. De temperatuur van maand k is lager dan die van maand l en daar maand k dichterbij de reductiemaand gelegen is, ondervindt deze meer temperatuursdaling. Hierdoor zal de temperatuur van maand k nooit groter worden dan die van maand l en dient deze niet in de referentieset te worden

¹⁰Het is ook toegestaan dat de maanden zuiver piekgelimiteerd zijn en dat de basisbelasting groter is dan nul.



Figuur 8.9: Flowchart van de werking van een reductie in basisbelasting.



Figuur 8.10: Illustratie van de bepaling van de referentiemaanden bij een reductie in basisbelasting. Volle blauwe maanden komen in aanmerking als referentie, de groene maand is limiterend en wordt gereduceerd en de witte maanden zijn irrelevant.

opgenomen.

Maand j heeft een hogere temperatuur dan maand l, maar ondervindt ook een grotere invloed van de basisbelastingsdaling. Het is a priori niet duidelijk welk van deze twee maanden het eerst limiterend gaat worden en daarom wordt maand j ook in de set van referentiemaanden opgenomen. Hetzelfde verhaal geldt ook voor maand i. Uiteindelijk moeten dus enkel de maanden n, o en k niet in de referentiemaandenset worden opgenomen.

Limitatie in laatste jaar. Voor een limitatie in het laatste jaar kan soortgelijke redenering als in het eerste jaar worden gemaakt, al verschilt de analyse voor de maanden vóór de reductiemaand (i.e. de maanden m, n en o). Omdat de limitatie in het laatste werkingsjaar zit, maar een reductie in elk jaar wordt doorgevoerd, gaan de temperaturen van maanden m, n en o in Figuur 8.10(b) nu ook veranderen. Welke van deze maanden relevant zijn, kan bepaald worden op basis van dezelfde redenering als hierboven (dus de afstand ten opzichte van de reductiemaand), maar nu met als reductiemaand deze uit het vorige werkingsjaar.

Maand o is aldus het verst afgelegen van de reductiemaand (in het vorige werkingsjaar) en kan aldus een potentiële limiterende maand worden, daar deze het minste temperatuursdaling gaat ondervinden. Maand n heeft een lagere temperatuur dan maand o en een hogere invloed van temperatuursdaling, dus deze zal irrelevant zijn en maand m gaat weer potentieel limiterend zijn, omdat a priori niet gezegd kan worden of de temperatuursdaling groot genoeg gaat zijn om de initieel hogere temperatuur te reduceren.



(a) Reductie met behoud van piek.

(b) Reductie zonder behoud van piek.

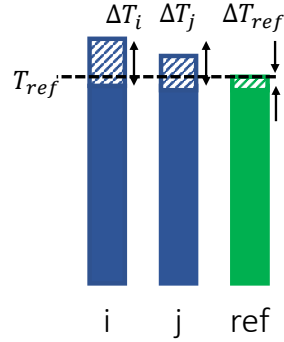
Figuur 8.11: Het verschil tussen een basisreductie met en zonder het behoud van piek.

Reduceren tot een referentiemaand Indien deze methode gevolgd wordt, zijn alle potentiële referentiemaanden op een inzichtelijke manier bepaald. Nu de referentiemaanden bepaald zijn, gaat het algoritme voor elk van deze potentiële referentiemaanden berekenen hoeveel reductie er kan doorgevoerd worden alvorens een bepaalde referentiemaand bereikt wordt. Een vraag die komt kijken bij de reductie van het basisvermogen is of de piek mee gereduceerd moet worden of niet. Indien bijvoorbeeld de basisbelasting van een maand gereduceerd wordt met $730kWh$ komt dit neer op een daling van het gemiddeld vermogen met $1kW$. Er is nu een netto piekvermogen ontstaan van $1kW$, omdat het piekvermogen onveranderd is gebleven. Een andere mogelijkheid bestaat erin om naast die reductie van $1kW$ gemiddeld maandvermogen (i.e. $730kWh$) ook de piek met $1kW$ te reduceren zodat de situatie van zuivere basisbelasting behouden blijft. Dit is weergegeven in Figuur 8.11.

Hier valt ook meteen op dat een reductie met behoud van de initiële piek een veel grotere basisreductie vereist om tot eenzelfde temperatuur te komen dan als de piek mee wordt gereduceerd.

Een onderscheid tussen deze twee mogelijkheden is cruciaal. Door het piekvermogen mee te reduceren, moet het piekvermogen van de externe installatie (potentieel) vergroot worden. Indien de investeringskost van de externe installatie heel groot is, maar de werkingskost laag (bijvoorbeeld een zonnecollector) kan het zijn dat een reductie van het piekvermogen niet voordelig is, maar een basisreductie wel. Daarom berekent het algoritme voor alle referentiemaanden beide gevallen.

Om te berekenen hoeveel basisbelasting er gereduceerd gaat worden, is Figuur 8.12 relevant. Om in overeenstemming te zijn met regel 2, is de eis dat de eindbelastingen zo moeten zijn dat de temperatuur van de limiterende maanden (hier i en j) gelijk is



Figuur 8.12: Grafische weergave van de berekening van de basisreductie. Hierin staat de blauwe arcering voor uitgevoerde reductie.

aan die van de referentiemaand. Omdat de reductie in maand i een dalend effect heeft op de temperatuur van maand j, is slechts een deel van ΔT_j te wijten aan een reductie in maand j zelf. Mathematisch gezien komt dit neer op Stelsel (8.12).

$$\begin{cases} T_{lim} - \Delta T_i &= T_{ref} - \Delta T_{ref} \\ T_{lim} - \Delta T_j &= T_{ref} - \Delta T_{ref} \end{cases} \quad (8.12)$$

waarin T_{lim} staat voor de temperatuurslimiet. In het geval de limitatie zich in het eerste jaar voordoet, geldt

$$\begin{cases} \Delta T_i &= f(\Delta Q_i) \\ \Delta T_j &= f(\Delta Q_i, \Delta Q_j) \\ \Delta T_{ref} &= f(\Delta Q_i, \Delta Q_j) \end{cases} \quad (8.13)$$

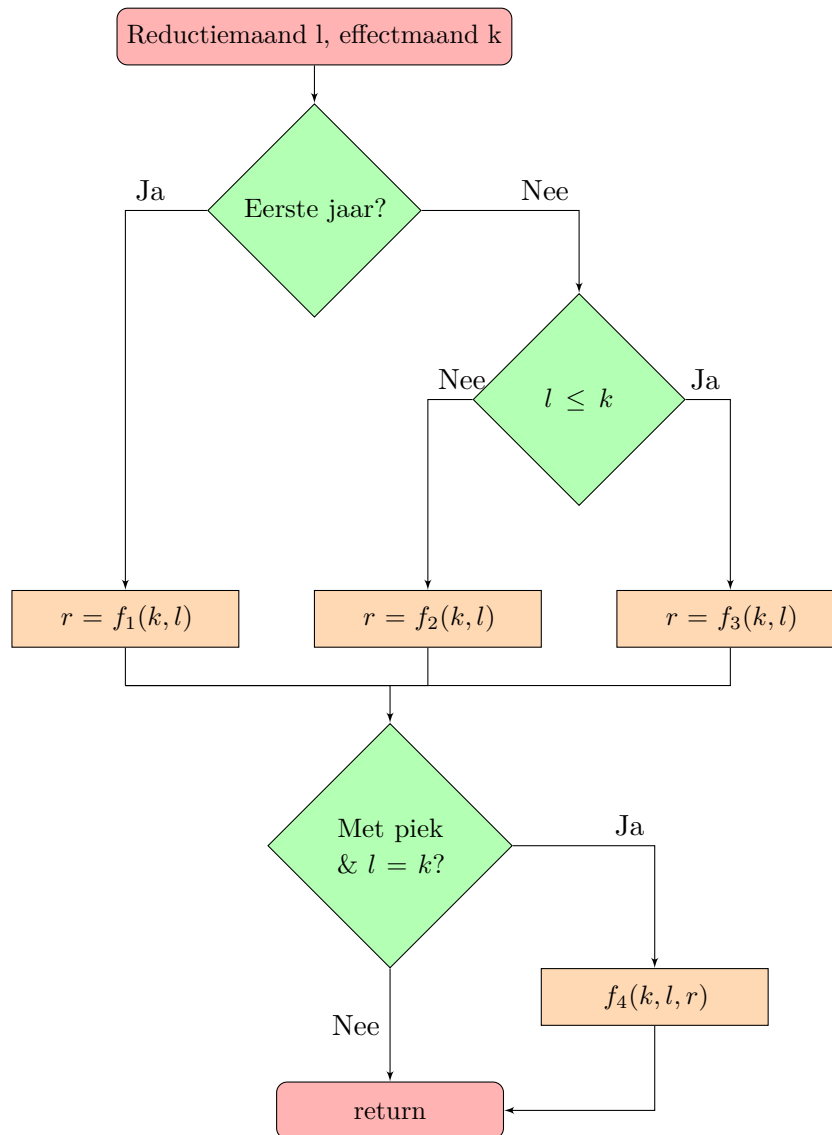
voor het laatste jaar daarentegen geldt

$$\Delta T_i = f(\Delta Q_i, \Delta Q_j) \quad (8.14)$$

Het is nu mogelijk een Matrixvergelijking op te stellen van Stelsel (8.12)

$$\begin{bmatrix} a_{ii} - b_i & a_{ij} - b_j \\ a_{ji} - b_i & a_{jj} - b_j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta Q_i \\ \Delta Q_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{lim} - T_{ref} \\ T_{lim} - T_{ref} \end{bmatrix} \quad (8.15)$$

waarin de coëfficiënt a_{ji} het effect van ΔQ_i op maand j beduidt. Evenzeer zijn b_i en b_j respectievelijk de effecten van een reductie van ΔQ_i en ΔQ_j op de T_{ref} . De bepaling van al deze coëfficiënten is afhankelijk van 1) of er een bijkomende piekreductie is meegenomen of niet, 2) of de limitatie zich in het eerste werkingsjaar voordoet of niet en 3) de afstand tussen de verschillende maanden. Dit kan grafisch weergegeven worden aan de hand van Figuur 8.13. De functies f_1 , f_2 , f_3 en f_4 zijn weergegeven in Vergelijking (8.16).



Figuur 8.13: Flowchart voor het berekenen van de coëfficiënten.

$$\begin{aligned}
f_1(k, l) &= \frac{h(k-l)}{2\pi k_s L} \\
f_2(k, l) &= \sum_{i=1}^{i=19} \frac{h(k-l+12i)}{2\pi k_s L} \\
f_3(k, l) &= \sum_{i=0}^{i=19} \frac{h(k-l+12i)}{2\pi k_s L} \\
f_4(k, l, r) &= \frac{g(t_h)}{2\pi k_s L} + r
\end{aligned} \tag{8.16}$$

waarin $g(t_h)$ de g-functiewaarde is voor de piek en de functie $h(x)$ gegeven wordt door

$$h(x) = \begin{cases} 0, & \text{als } x < 0 \\ g(x), & \text{als } x = 0 \\ g(x) - g(x-1) & \text{als } x > 1 \end{cases} \tag{8.17}$$

Deze vergelijkingen dienen om de verschillende coëfficiënten te bepalen die weergeven hoe een bepaalde reductie de temperatuur in een andere maand beïnvloedt. Ze maken allen gebruik van de g-functie (zie 5.1.1). Verwijzend naar Figuur 8.13 is $f_1(k, l)$ van toepassing in het geval dat de limitatie zich in het eerste jaar bevindt en de reductiemaand vroeger valt dan de maand waarop het effect wordt berekend. Omdat de limitatie zich in het eerste jaar bevindt, is er slechts één superpositie van g-functiewaarden relevant namelijk de responsie van de reductie in maand l op maand k . Deze wordt berekend door $h(x)$ op een soortgelijke manier zoals ook de dimensionering gebeurde die rechtstreeks gebruik maakt van de g-functies (zie Sectie 7.2). Indien de reductiemaand (l) na de effectmaand (k) komt in het eerste jaar, ondervindt deze geen invloed van de reductie.

Voor functies $f_2(k, l)$ en $f_3(k, l)$ ligt dit anders. Hier is de limitatie in het laatste jaar en moeten er dus over alle jaren heen superposities gebeuren van de thermische pulsen. Voor het geval van $f_3(k, l)$ is dat er eentje meer, omdat hier de effectmaand na de reductiemaand valt, ondervindt de effectmaand ook in het eerste jaar effect van de reductie (zie ook Figuur 8.10 en de uitleg over de referentiemaanden hierboven).

Indien tenslotte de piek mee wordt gereduceerd, dient functie $f_4(k, l, r)$ te worden gebruikt die bovenop het effect van de reductie van basisvermogen, ook het effect van een reductie in piekvermogen meeneemt. Omdat het piekvermogen geen beduidend effect heeft op de temperatuur in de ondergrond¹¹, is deze invloed enkel relevant indien de reductiemaand l dezelfde is als de effectmaand k . Indien deze flowchart wordt gevolgd, kunnen alle coëfficiënten uit de Matrixvergelijking (8.15) bekomen worden.

¹¹Wel op de fluïdumtemperatuur.

Reduceren tot een gebalanceerd veld Voor de volledigheid is het ook nodig om het veld te dimensioneren op de onbalans. Het is namelijk mogelijk dat, indien (zoals hierboven) gereduceerd wordt tot een bepaalde referentiemaand, er zoveel basisbelasting wordt gereduceerd dat regel 3 wordt overtreden. Daarom wordt ook het geval onderzocht waarin de totale basisbelastingreductie zo groot is dat het veld net gebalanceerd is. Dit komt neer op Vergelijking (8.18) waarbij nu als eis wordt gesteld dat de temperaturen in de limiterende maanden gelijk zijn aan elkaar en dat de som van de reducties de onbalans is.

$$\begin{cases} \Delta T_i = \Delta T_j \\ \Delta Q_i + \Delta Q_j = \text{onbalans} \end{cases} \quad (8.18)$$

Dit kan dan herschreven worden in matrixvorm als

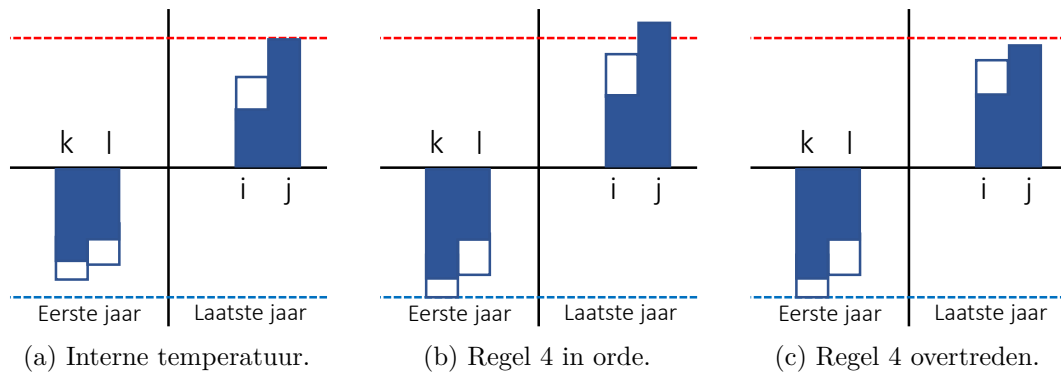
$$\begin{bmatrix} a_{ii} - a_{ji} & a_{ij} - a_{jj} \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta Q_i \\ \Delta Q_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \text{onbalans} \end{bmatrix} \quad (8.19)$$

De coëfficiënten in Stelsel (8.19) kunnen evenzeer aan de hand van de flowchart in Figuur 8.13 en Vergelijking (8.16) bepaald worden.

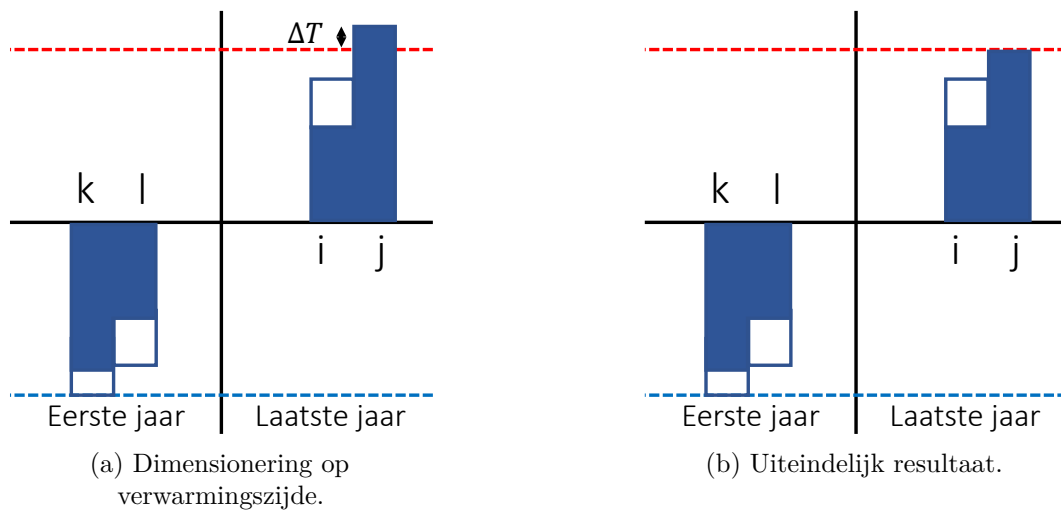
Nadat de reducties bepaald zijn (zowel op basis van een externe referentiemaand als op basis van de onbalans), wordt gecontroleerd op de eerste en de derde reductieregel (zie ook Figuur 8.9). Het is namelijk mogelijk dat om dezelfde temperatuur te bekomen als de referentiemaand, er een grotere reductie in basisbelasting nodig is dan die er in de te reduceren maand voorhanden is. De belasting zou dan negatief gaan, wat een overtreding van regel 1 is. Het is ook mogelijk dat door een te grote basisreductie, de onbalans van het veld verandert en dat regel 3 geschonden wordt (cf. supra).

Indien beide regels in orde zijn, wordt tenslotte gekeken over alle berekende basisreducties welke de kleinste is. Deze reductie wordt dan genomen en aan de set van mogelijke reducties toegevoegd. Dit is nodig om in overeenstemming te zijn met regel 2 en 3, want indien een grotere reductie wordt doorgevoerd dan de minimale, wordt er extra gereduceerd zonder dat het veld kleiner wordt, omdat de referentiemaand horende bij de minimale reductie nu limiterend is (zie ook Figuur 8.2). Indien de minimale reductie het gevolg is van een reductie tot een gebalanceerd veld, moet deze ook genomen worden omdat een grotere reductie een overtreding van regel 3 zou impliceren.

Zoals ook bij de piekreductie het geval was, dient er nog gecontroleerd te worden op regel 4. Hiervoor wordt, voor alle mogelijke reducties, eerst de reductie uitgevoerd en wordt het veld nadien op de andere limitatie gedimensioneerd. De redenering is weergegeven in Figuur 8.14. In Figuur 8.14(a) staat de initiële toestand weergegeven en na reductie wordt ofwel de situatie van (b) of (c) bekomen. In het geval van Figuur 8.14(b) is dit een positief resultaat omdat de limitatie in het laatste jaar hier een strengere eis oplegt en regel 4 dus intact blijft. Echter voor het geval van Figuur



Figuur 8.14: Illustratie van de controle van regel 4 voor een reductie in basisbelasting.



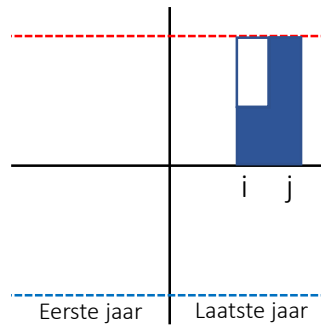
Figuur 8.15: Illustratie van de herberekening van de basisbelastingreductie.

8.14(c) is dit niet het geval en zal de basisreductie moeten worden gereduceerd. Hoe dit gebeurt, staat weergegeven in Figuur 8.15.

De redenering achter Figuur 8.15 is dezelfde als achter Figuur 8.8. Concreet komt dit neer op het doorvoeren van een basisreductie ΔQ zodat een ΔT bereikt wordt die maakt dat de koelzijde nu ook limiterend is. De hoeveelheid reductie kan dan wederom bepaald worden door gebruik te maken van het Stelsel (8.12) waarin T_{ref} nu op de maximale temperatuur wordt gezet, wat maakt dat het rechterlid gelijk wordt aan nul. Omdat T_{ref} nu geen functie meer is van de basisreducties, worden de termen b_i en b_j in Stelsel (8.15) ook gelijk aan 0.

Indien al deze stappen gevolgd worden, kan een set¹² aan basisreducties bekomen

¹²Deze reductie kan maximaal twee mogelijkheden teruggeven: hetzij een reductie met inbegrip van het dalen van het piekvermogen en een waarin het piekvermogen behouden blijft.



Figuur 8.16: Voorbeeld van een gemengde piek-basislimitatie.

worden die volledig in overeenstemming zijn met de vier vooropgestelde reductieregels.

Piek-basisreductie

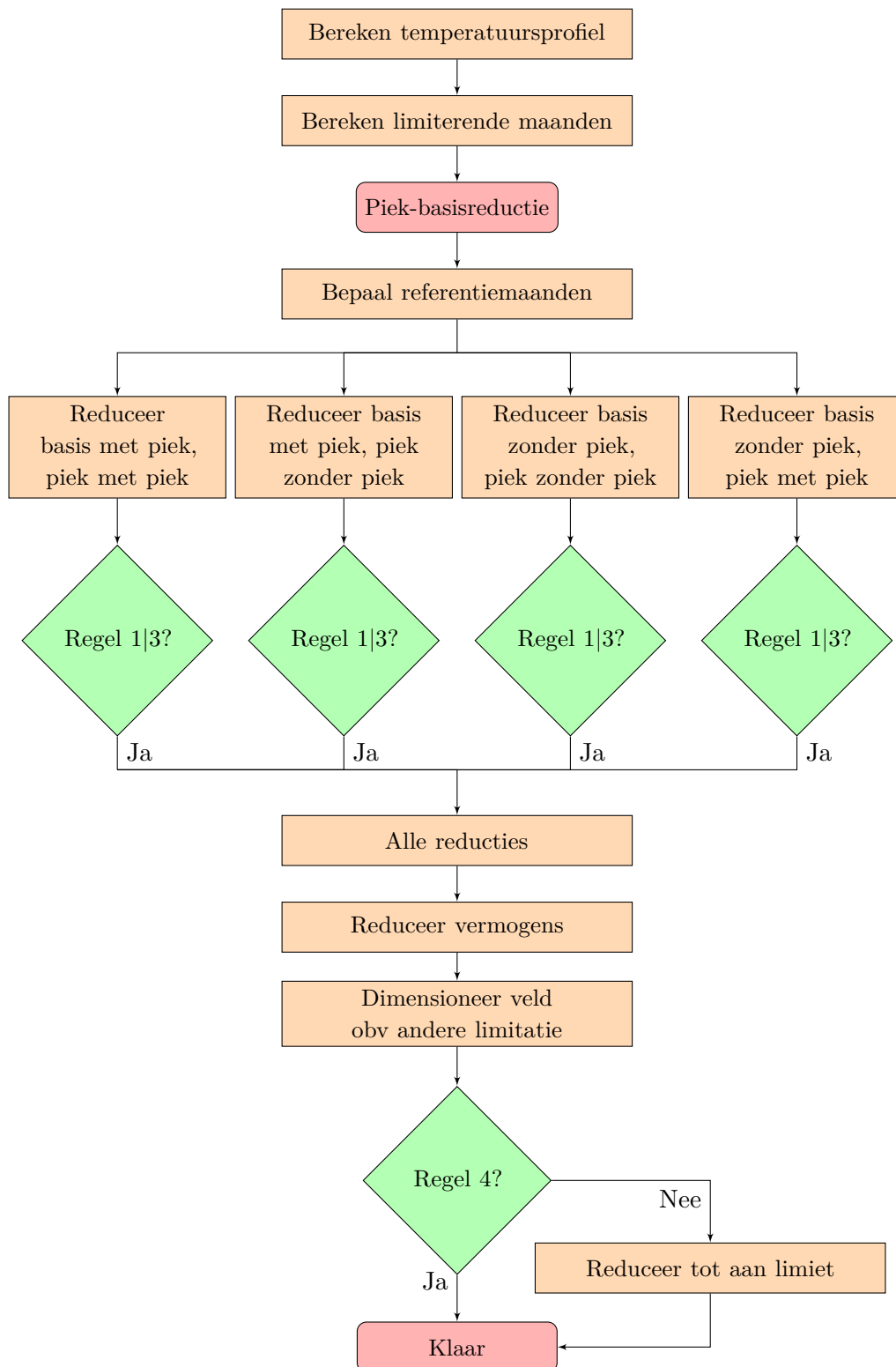
Een piek-basislimitatie is de laatste mogelijke toestand waarin een boorveld (in zuivere limitatie¹³) zich kan bevinden. Dit treedt op op het moment dat er bij de gelimiteerde maanden zowel pieklimitaties als basislimitaties voorkomen. De manier om zo een gelimiteerd veld te reduceren, is een combinatie van zowel de piekreductie als de basisreductie en wordt hieronder nader toegelicht. Een voorbeeld van een gecombineerde piek-basislimitatie is te zien in Figuur 8.16.

Om een veld dat piek-basisgelimiteerd is te reduceren, kan wederom gebruik worden gemaakt van een flowchart te vinden in Figuur 8.17. Zoals voorheen start ook deze flowchart met een berekening van de temperatuurprofielen en de limiterende maanden. Als dan blijkt dat het veld piek-basisgelimiteerd is, kan de reductie opgestart worden.

Eerst en vooral moeten de referentiemaanden bepaald worden. Omdat er nu zowel piek- als basislimitaties zijn, worden zowel interne als externe referentiemaanden meegenomen. De redenering achter de externe referentiemaanden staat bij de basisreductie uitgelegd en blijft ongewijzigd. Hetzelfde kan gezegd worden voor de interne referentiemaanden die staan uitgelegd bij de piekreductie.

Een volgende stap is de berekening van de reductie. Zoals gezien kan worden op de flowchart in Figuur 8.17 zijn er vier mogelijkheden om te reduceren. Deze zijn een combinatie van een basisreductie met of zonder het behoud van piekvermogen (voor de basisgelimiteerde maanden) en een piekreductie of een basisreductie (in de piekgelimiteerde maanden). Naar analogie met Figuur 8.12 is in Figuur 8.18 grafisch weergegeven hoe de reductie kan worden doorgevoerd. In deze figuur is maand *i* gelimiteerd door een piek en is maand *j* basisgelimiteerd en wordt de reductie nu ten

¹³Een zuivere limitatie was gedefinieerd als een veld dat ófwel door koude zijde ófwel door warme zijde is gelimiteerd. Indien dit niet zo is, wordt van een gemengde limitatie gesproken (zie Sectie 8.2.3).



Figuur 8.17: Flowchart voor de piek-basisreductie.



(a) Reduceer met piek in maanden met pieklimitatie.

(b) Reduceer overal met basis.

Figuur 8.18: Illustratie van de berekening van de piek-basisreductie. Hierin is de gearceerde balk hetgeen gereduceerd is en de witte balk het nettopiekvermogen.

opzichte van een externe referentiemaand gedaan. In de maanden die piekgelimiteerd zijn, kan gekozen worden om de piek te reduceren of om de basis te reduceren (zie respectievelijk Figuur 8.18(a) en Figuur 8.18(b)). De reden van dit onderscheid is omdat het a priori niet geweten is of de reductie in piek dan wel de reductie in basisbelasting economisch voordeliger is (cf. uitleg over reductiemaanden op Pagina 58). Daarom moeten ze allebei worden berekend¹⁴. Mathematisch kan dit geschreven worden als Stelsel (8.20).

$$\begin{cases} \Delta T_i &= T_{ref} - \Delta T_{ref} \\ \Delta T_j &= T_{ref} - \Delta T_{ref} \end{cases} \quad (8.20)$$

In het geval de limitatie zich in het eerste jaar voordoet, geldt

$$\begin{cases} T_{lim} - \Delta T_i &= f(\Delta Q_{p,i}, \Delta Q_{b,i}) \\ T_{lim} - \Delta T_j &= f(\Delta Q_{b,j}, \Delta Q_{b,i}) \\ \Delta T_{ref} &= f(\Delta Q_{b,j}, \Delta Q_{b,i}) \end{cases} \quad (8.21)$$

Waarin het subscript p staat voor de piekbelasting en b voor de basisbelasting¹⁵. Zoals te zien is, is de temperatuur in maand j geen functie van de piekreductie in de eerste maand. In het geval dat de limitatie zich in het laatste jaar voordoet, ondervindt maand i ook effect van de basisreductie. Er geldt dan dat

¹⁴Voor de volledigheid dient te worden opgemerkt dat naast een reductie met interne/externe referentiemaanden ook een reductie tot een gebalanceerd veld hier van toepassing is. Dit is echter volledig analoog aan de uitleg op Pagina 62.

¹⁵In de manier hoe het algoritme is opgesteld, zijn $Q_{p,i}$ en $Q_{b,i}$ nooit beide verschillend van nul. Als dit wel zou zijn, is het Stelsel (8.23) ondergedetermineerd. Dit zou kunnen verholpen worden door een financieel verband tussen een reductie in piek en basis in rekening te brengen, maar door de scheiding van het probleem, zoals dat in deze thesis gebeurde, is dit niet mogelijk.

$$\Delta T_i = f(\Delta Q_{p,i}, \Delta Q_{b,i}, \Delta Q_{b,j}) \quad (8.22)$$

Stelsel (8.20) kan herschreven worden in matrixvorm als

$$\begin{bmatrix} a_{i,pi} & a_{i,bi} - b_{bi} & a_{bj} - b_{bj} \\ 0 & a_{j,bi} - b_{bi} & a_{j,bj} - b_{bj} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta Q_{p,i} \\ \Delta Q_{b,i} \\ \Delta Q_{b,j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{lim} - T_{ref} \\ T_{lim} - T_{ref} \end{bmatrix} \quad (8.23)$$

Hierin valt op dat $Q_{p,i}$ geen invloed heeft op de temperatuur in maand j , omdat een piekreductie enkel effect heeft op de eigen maand. Voor de berekening van de coëfficiënten kan beroep worden gedaan op Figuur 8.13 en Stelsel (8.16). Zoals hierboven gezegd moeten hier twee berekeningen worden uitgevoerd: één met een piekreductie en één met een basisreductie in de pieklimiterende maanden. In het laatste geval is de term $a_{i,pi} = 0$ en worden de andere coëfficiënten volgens de flowchart van Figuur 8.13 bepaald. In het laatste geval zijn de termen $a_{i,bi} = a_{j,bi} = 0$ en wordt $a_{i,pi}$ gegeven door

$$a_{i,pi} = \frac{\Delta T_i}{\frac{g(t_h)}{2\pi k_s} + R_b^*} \quad (8.24)$$

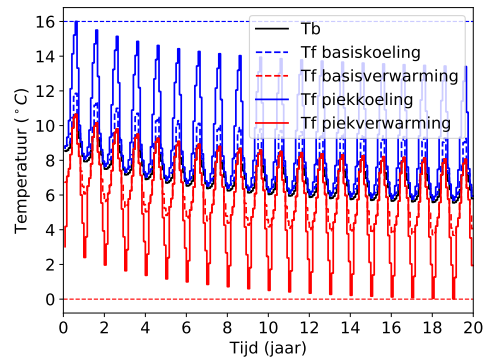
Na elke reductie moet wederom gecontroleerd worden of aan regel 1 en 3 is voldaan. De andere stappen zijn dezelfde als in de basisreductie (zie Figuur 8.13), met een klein verschil in de herberekening van de reductie. Hiervoor wordt nu gebruik gemaakt van onderstaand stelsel.

$$\begin{bmatrix} a_{i,pi} & a_{i,bi} & a_{bj} \\ 0 & a_{j,bi} & a_{j,bj} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta Q_{p,i} \\ \Delta Q_{b,i} \\ \Delta Q_{b,j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8.25)$$

Waar de coëfficiënten berekend kunnen worden op de manier die hierboven beschreven staat.

8.2.3 Gemengde limitatie

Van een gemengde boorveldlimitatie is sprake als het veld zowel door de minimale als maximale temperatuur begrensd is. Dit is bijvoorbeeld het geval in Figuur 8.19, waar het veld gelimiteerd is in het eerste jaar door koelvraag en in het laatste jaar door de warmtevraag. Het is duidelijk dat de maatregelen uit Sectie 8.2.2 hier ontoereikend zijn, omdat indien slechts een van deze twee limitaties verzwakt wordt, het veld niet in grootte afneemt, wat in tegenspraak is met de eis van een strikt monotoon dalend veld (zie Sectie 8.1). Dit is de reden waarom een veld met een gemengde limitatie een andere aanpak behoeft dan een veld met een zuivere limitatie. De manier waarop een veld met gemengde limitatie wordt gereduceerd, is schematisch weergegeven in Figuur 8.20 en een voorbeeld is te vinden in Figuur 8.21.



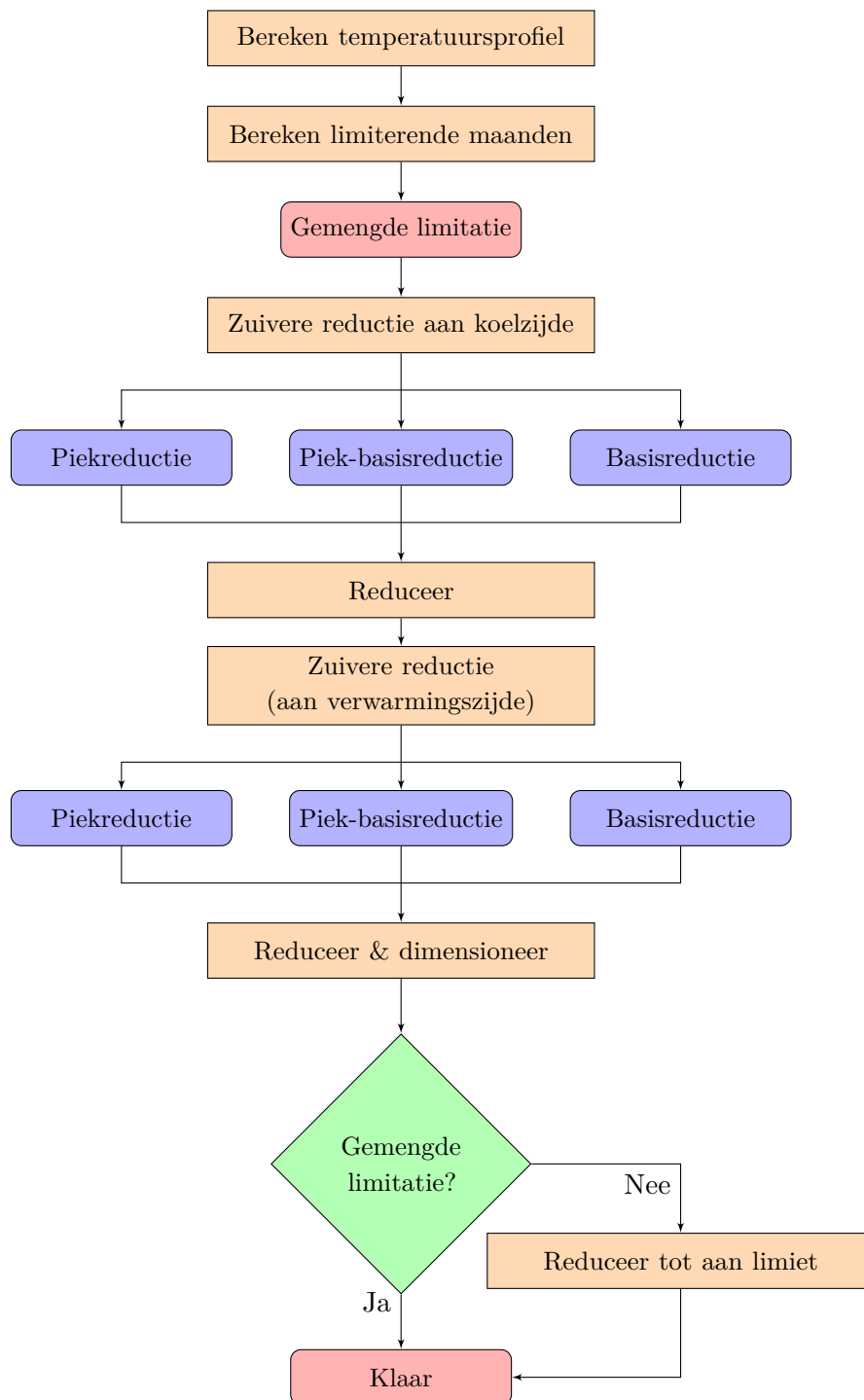
Figuur 8.19: Voorbeeld van een temperatuursverloop in een gemengde limitatie.

Zoals duidelijk blijkt uit Figuur 8.20 bestaat de reductie van een gemengde limitatie erin om sequentieel twee zuivere reducties door te voeren. Hoewel het in se niet uitmaakt aan welke zijde er begonnen wordt, is in deze thesis arbitrair gekozen voor de koelzijde. De drie reducties worden berekend (indien ze mogelijk zijn) voor het geval dat het veld een zuivere limitatie aan koelzijde zou hebben. Belangrijk is hierbij dat de finale check op regel 4 in ieder van deze reducties nu **niet** wordt uitgevoerd. Er zou immers altijd uit volgen dat de reductie niet kan doorgaan, omdat het veld niet in grootte afneemt. Momenteel is regel 4 dus overtreden.

Vervolgens wordt het veld gereduceerd voor elk van de reductieopties uit de zuivere limitatie (zie Figuur 8.21(a) en (b)). Op dit moment is het veld zuiver gelimiteerd aan verwarmingszijde. Nu worden hier ook de verschillende reductieopties voor zuivere limitaties bekeken en uitgevoerd. Hier wordt de finale check op regel 4 **wel** uitgevoerd (Figuur 8.21(c)) en eventueel wordt deze laatste reductie herberekend (zie Figuur 8.21(d)). Wederom wordt voor elk van deze reductieopties het veld gereduceerd en gedimensioneerd.

De laatste stap bestaat erin om te kijken of het veld opnieuw in een gemengde limitatie zit. Indien dit namelijk niet zo is (Figuur 8.21(e)), is er langs de koelzijde te sterk gereduceerd. Indien in de vorige stap met de zuivere limitatie bleek dat een correctie nodig was om regel 4 te doen kloppen, gaat het veld nu in orde zijn en is het gelimiteerd aan beide zijden en is het kleiner geworden (Figuur 8.21(d)). Perfect volgens de vooropgestelde reductieregels. Indien echter deze correctie niet nodig was (Figuur 8.21(e)), impliceert dit dat de reductie aan de verwarmingszijde niet voldoende was om ook de maximumtemperatuur te bereiken.

De initiële reductie aan de koelzijde wordt nu ongedaan gemaakt en het veld wordt gereduceerd tot aan de temperatuurslimiet met methodes die hierboven beschreven staan (Figuur 8.21(f)). Door dit stappenplan te volgen, wordt altijd voor een gemengde limitatie een reductie gevonden die aan de vooropgestelde reductieregels



Figuur 8.20: Flowchart van de veldreductie in het geval van een gemengde limitatie.

voldoet.

8.3 Regeneratie

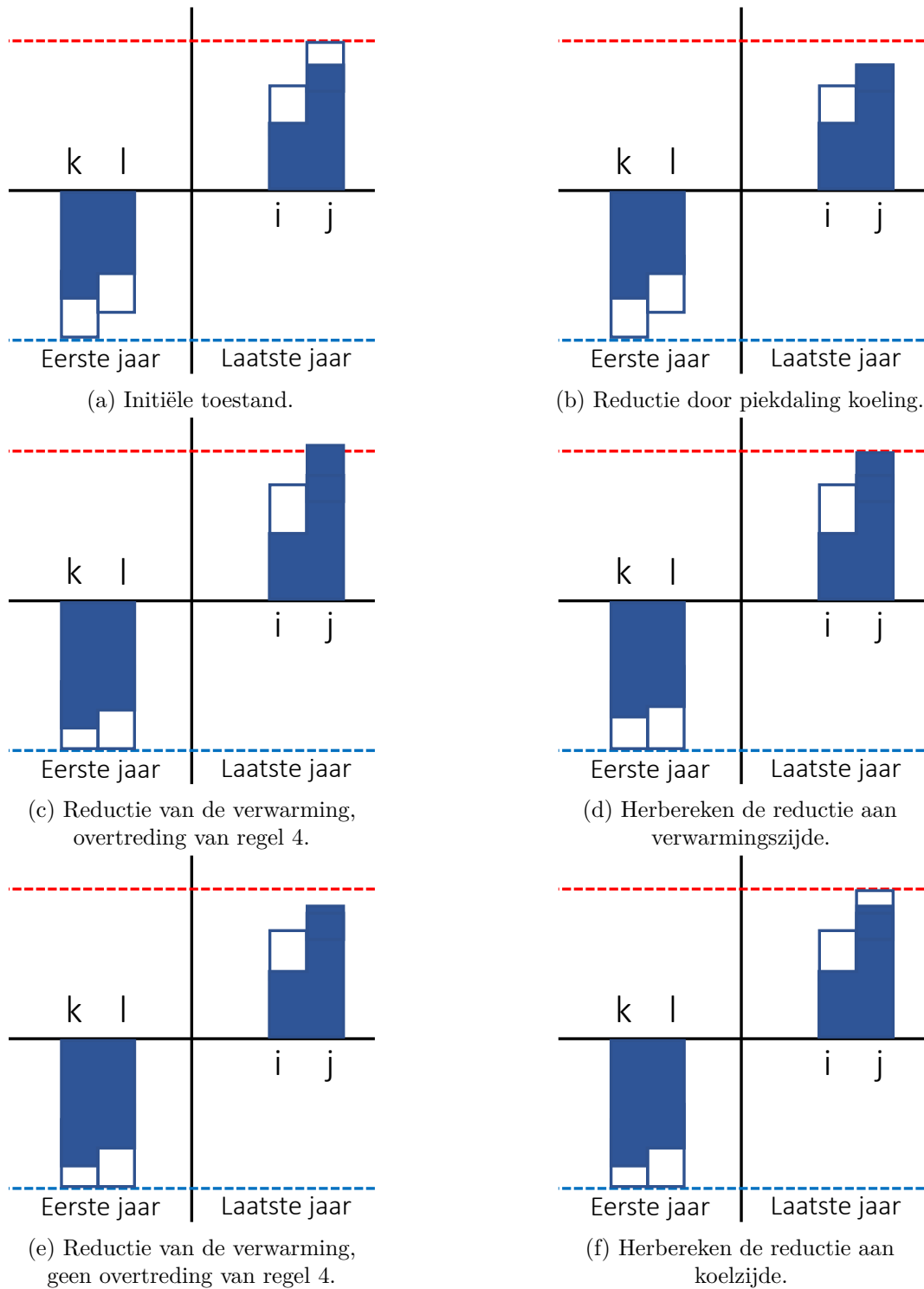
Regeneratie is het begrip dat wordt gebruikt indien een bepaalde technologie het veld doelmatig gaat opwarmen of afkoelen om aldoo de onbalans te reduceren en op die manier het veld kleiner te maken (zie ook Sectie 3). Het verschilt dus van de hierboven beschreven basisreductie als volgt. Indien een bepaald veld koelvraaggedomineerd is en gelimiteerd is door de koelvraag in het laatste jaar, kan als maatregel worden genomen dat een deel van de basisbelasting koeling door een externe technologie wordt geleverd. Dit reduceert de onbalans van het veld. Het is echter mogelijk dat deze externe technologie relatief kostelijk is (bijvoorbeeld de werkingskosten van een externe airco), waardoor een alternatieve oplossing gewenst is. Deze oplossing bestaat in de vorm van regeneratie.

In de situatie van hierboven zou regeneratie impliceren dat 's nachts (wanneer de temperatuur voldoende laag is) een droge koeler (zie Sectie 2.1) zou gebruikt worden om de temperatuur van de bodem af te koelen (i.e. te regenereren). Dit kan geïnterpreteerd worden als zijnde equivalent met een stijging van de basisbelasting verwarming daar dit ook de bodem zou afkoelen.

Het is echter ook mogelijk dat het wenselijk is dat er bijvoorbeeld meer basisbelasting van het veld wordt gehaald dan strikt noodzakelijk is voor de veldreductie. Dit kan bijvoorbeeld het geval zijn voor situaties waarbij zonnecollectoren voorhanden zijn. Het kan dan economisch voordelig zijn om deze te laten werken in plaats van de GSHP, al heeft dat zijn effect op de onbalans en dus de veldgrootte.

Het probleem van regeneratie en extra basisreductie is echter relatief complex. In elke maand kan basisvermogen verhoogd of verlaagd worden en in elke maand heeft dat een iets ander effect op de boorveldgrootte¹⁶. In welke maand echter geregeneerd gaat worden, is a priori niet geweten, daar sommige types van technologieën geschikt voor regeneratie (zonnecollectoren en droge koelers) aanwezig moeten zijn met voldoende beschikbaar vermogen en met gunstige externe condities (zonneflux, temperatuur ...). Hetzelfde geldt voor de vraag of er een extra basisreductie gaat zijn. De keuze voor regeneratie of extra basisreductie is dan ook een keuze die toebehoort aan het technologieel deel van deze optimalisatie. Waar deze sectie om draait, is om te berekenen wat het slechtstegeval effect zou zijn op de boorveldgrootte bij een verandering van de onbalans (ten gevolge van regeneratie of een extra daling van basisbelasting). De velden waarvoor dit wordt berekend, zijn deze die reeds de reductiestap (uit Sectie 8.2) hebben doorgemaakt en die dus in aanmerking komen om door het technologieprobleem als economisch gunstig te worden bestempeld.

¹⁶Dit is omdat het effect van een verandering in basisbelasting in een bepaalde maand op een andere maand groter is naarmate deze er dichterbij ligt.



Figuur 8.21: Illustratie van het verloop van een reductie in een veld dat een gemengde limitatie heeft.

In de volgende secties staat voor zowel regeneratie als een extra basisdaling uitgewerkt hoe de verandering van onbalans in rekening kan worden gebracht. Er worden twee verschillende mogelijkheden onderscheiden: velden met een limitatie in het eerste werkingsjaar en velden met een limitatie in het laatste¹⁷. Beide worden in respectievelijk Sectie 8.3.1 en Sectie 8.3.2 besproken.

8.3.1 Veldlimitatie in het eerste jaar

Op elk moment zijn er vier maatregelen mogelijk die invloed hebben op de onbalans van het veld: een daling van de koelvraag of de vraag naar warmte enerzijds en de regeneratie door koeltechnologieën of verwarmingstechnologieën anderzijds. Zoals hierboven reeds werd aangehaald, zijn deze vier mogelijkheden enigszins verbonden, want een reductie in koelvraag zal hetzelfde effect op de onbalans hebben als een stijging van de basisbelasting van de verwarming. De mogelijkheden zullen dus telkens in paar behandeld worden. Voor de uitleg in deze sectie, wordt gebruik gemaakt van Figuur 8.22 dat een voorbeeld is van een veld in toestand HC¹⁸, maar eenzelfde redenering kan ook gemaakt worden voor een veld in toestand CH.

Een eerste blik op de Figuur 8.22 laat al meteen blijken dat zowel een onbalansstijging naar boven als naar onder toe, initieel weinig effect gaat hebben. De limitatie zit in het eerste werkingsjaar en zolang deze niet naar het laatste jaar is verschoven, is er weinig tot geen verandering in de grootte van het boorveld. Indien in dit geval de onbalans meer positief wordt (door conventie betekent dat dat het veld jaar na jaar opwarmt, wat equivalent is met een daling van de basisbelasting verwarming of een regeneratie door bijvoorbeeld zonnecollectoren), zal dit noch positief noch negatief zijn tot de onbalans volledig is weggewerkt. Nadien zit de belasting in het laatste jaar en zal een extra onbalansstijging ook een vergroting van het veld teweegbrengen.

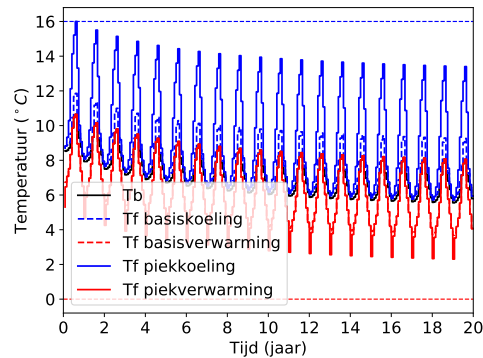
Eenzelfde redenering kan worden gemaakt langs de andere kant van het veld waar een regeneratie door bijvoorbeeld een droge koeler of het verminderen van de basisbelasting koeling geen effect op de grootte zal hebben tot de minimale temperatuur in het laatste jaar wordt bereikt. Vanaf dan zal een extra onbalansstijging aan deze zijde direct aanleiding geven tot een vergroting van het veld. Deze twee situaties zullen hieronder nu gekwantificeerd worden.

Stijging van onbalans

Een stijging van de onbalans (i.e. het ervoor zorgen dat de limitatie richting maximale temperatuur gaat in het laatste jaar) kan bewerkstelligd worden door een vermindering van de basisbelasting van de verwarming of door regeneratie met behulp van bijvoorbeeld zonnecollectoren. Zoals hierboven besproken, zal in een

¹⁷Het onderscheid tussen beide is van belang voor het lineair programma beschreven in Hoofdstuk 9

¹⁸Warmtevraaggedomineerd en koelvraaggelimiteerd.



Figuur 8.22: Voorbeeld van een veld dat in het eerste jaar is gelimiteerd.

eerste fase dit geen effect¹⁹ op de boorveldgrootte hebben en pas vanaf het moment dat het veld ook in het laatste jaar gelimiteerd is tot een directe vergroting van het veld leiden. Deze twee fases worden hieronder besproken.

Fase 1: geen extra kost noch besparing Indien het veld warmtevraaggedomineerd is (en de onbalans aldus negatief is door conventie) en toch gelimiteerd is in het eerste jaar, zal een basisdaling van de verwarming of een regeneratie door koeltechnologie geen kost opleveren tot het veld volledig gebalanceerd is.

Fase 2: extra kost Vanaf het moment dat de volledige onbalans is gereduceerd en het veld is gebalanceerd, zal een verdere verhoging van de onbalans nadelig zijn voor de grootte. Om dit te kwantificeren wordt gebruik gemaakt van de dimensionering van Bernier (zie Sectie 7.1.1). Vergelijking (7.1) is hieronder hernomen als Vergelijking (8.26).

$$L = \frac{q_y R_{y,g} + q_m R_{m,g} + q_h R_{d,g} + q_h R_b^*}{T_m - T_g} \quad (8.26)$$

waarin q_y stond voor een jaarlijks vermogen (gekoppeld aan de onbalans) en q_m het vermogen in de maand met de hoogste piek. Er wordt nu een arbitraire q_o gekozen als q_y om het effect van de onbalansverandering op de grootte te bepalen. In het geval van een daling van de basisbelasting koeling, is dit toereikend, maar voor het geval van een regeneratie is er een slechtere situatie te bedenken. Indien bijvoorbeeld de regeneratie gebeurt in de maand die limiterend is, zal het veld ook rechtstreeks in grootte toenemen ten gevolge van de regeneratie in die maand. Om dit in rekening te brengen, wordt de regeneratie q_m vermeerderd met q_o , hetgeen impliceert dat het gemiddeld jaarlijks vermogen ook de basisbelasting in de piekmaand beïnvloedt en

¹⁹Strikt genomen klopt dit niet. Indien in het geval van Figuur 8.22 regeneratie plaatsgrijpt in de maand die limiterend is, zal het veld toch lichtjes in grootte stijgen. Omdat in wat volgt met een slechtstegevalbenadering wordt gewerkt, is dit effect echter verwaarloosbaar.

zo sterker bijdraagt aan een vergroting van het veld.

Vervolgens wordt het veld gedimensioneerd door Vergelijking (8.26) en wordt berekend wat het lengteverschil is na de onbalansstijging ten opzichte van een volledig gebalanceerd veld. Deze veldgroottestijging wordt nadien gedeeld door de hoeveelheid onbalans (in kWh) die er is aangelegd om deze nieuwe grootte te bekomen en wordt er op die manier een lengtestijging per eenheid energetische onbalans bekomen.

Daling van onbalans

Voor een daling van de onbalans (ten gevolge van een vermindering van de basisbelasting koeling of een regeneratie door bijvoorbeeld een droge koeler) kan soortgelijke redenering als hierboven worden gemaakt. Een daling van de onbalans zal nu pas nadelig zijn op het moment dat de minimale temperatuur van het veld in het laatste jaar wordt bereikt. Dit punt is nu niet meer, zoals hierboven, bij een volledig gebalanceerd veld, maar vereist een onbalans in de verwarmingsrichting. De hoeveelheid extra onbalans die nodig is om deze grens te bereiken, kan gevonden worden door de huidige lengte gelijk te stellen aan de lengte, moest het veld gelimiteerd zijn in het laatste jaar. Mathematisch komt dit neer op Vergelijking (8.26) en deze vergelijking te herschrijven als Vergelijking (8.27) voor het geval het gaat om een basisreductie of als Vergelijking (8.28) indien het gaat om een regeneratie.

$$q_o = \frac{L(T_f - T_g) - (q_h R_b^* + q_h R_{d,g} + q_m R_{m,g} + q_y R_{y,g})}{R_{y,g}} \quad (8.27)$$

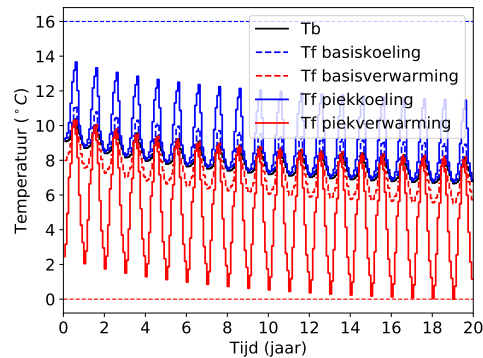
$$q_o = \frac{L(T_f - T_g) - (q_h R_b^* + q_h R_{d,g} + q_m R_{m,g} + q_y R_{y,g})}{R_{y,g} + R_{m,g}} \quad (8.28)$$

waarin q_o de benodigde hoeveelheid onbalans is om het veld ook in het laatste jaar te limiteren. Het verschil tussen Vergelijkingen (8.27) en (8.28) zit in de noemer. In het geval van regeneratie is, zoals hierboven reeds uitgelegd staat, het meest nadelige geval datgene waarbij de regeneratie plaatsgrijpt in de meest kritieke maand. Daarom wordt er hier ook door $R_{m,g}$ gedeeld. Vervolgens is een daling van de onbalans ongunstig en kan de veldgroottestijging per eenheid energetische onbalans berekend worden zoals hierboven beschreven staat.

8.3.2 Veldlimitatie in het laatste jaar

Voor het geval de limitatie zich in het laatste jaar voordoet, kan de verandering van de onbalans (in tegenstelling tot een limitatie in het eerste jaar) wel een boorveldreductie betekenen. Dit kan begrepen worden aan de hand van Figuur 8.23. Hieruit blijkt meteen dat een verdere verlaging van de onbalans²⁰, direct tot een groter veld gaat leiden. De verandering van grootte per eenheid energetische onbalans kan zoals hierboven beschreven staat, bepaald worden. Voor het geval van een vermindering

²⁰Merk op dat door conventie de onbalans negatief is indien de warmtevraag overheerst op de koudevraag.



Figuur 8.23: Voorbeeld van een veld dat in het laatste jaar is gelimiteerd.

van de onbalans (i.e. het verminderen van de basisbelasting verwarming of regeneratie door bijvoorbeeld een zonnecollector), kan een kleiner boorveld bekomen worden.

Tijdens deze veldreductie kan het boorveld eerst terecht komen in een volledig gebalanceerde toestand of eerst in een HC-toestand. Welk van de twee gevallen het gaat zijn, kan bepaald worden door het veld in het eerste jaar te dimensioneren op basis van de methode van Monzo (zie Sectie 7.1.2). Indien blijkt dat de lengte om te voldoen aan een limitatie aan de koelzijde de grootste is, zal het veld eerst terecht komen in een HC-toestand. Indien blijkt dat de lengte aan de verwarmingszijde groter is, zal het veld eerst volledig gebalanceerd zijn. Beide mogelijkheden zijn hieronder toegelicht.

Reductie tot aan gebalanceerde toestand

In het geval dat de dimensionering in het eerste jaar uitwijst dat de temperatuurslimitatie nog altijd aan de verwarmingszijde is, kan het veld gereduceerd worden tot de volledige onbalans is weggewerkt. De totale veldreductie kan dan gedeeld worden door de vermindering in onbalans om aldus een veld daling per eenheid energetische onbalans te bekomen.

Vervolgens gaat een verdere daling van het basisvermogen verwarming of stijging van de regeneratie door bijvoorbeeld zonnecollectoren, eerst geen effect hebben op het boorveld tot weer een limitatie in het laatste werkingsjaar is bereikt, dit keer aan de koelzijde. Nadien is een verderzetting van deze trend nadelig voor de grootte. Deze laatste twee situaties komen neer op het geval van een veld dat gelimiteerd is in het eerste werkingsjaar en staat hierboven beschreven.

Reductie tot aan HC

In het geval dat de dimensionering in het eerste jaar uitwijst dat de temperatuurslimitatie aan de koelzijde het snelst bereikt wordt, is het veld nog niet volledig gebalanceerd.

De hoeveelheid onbalansreductie die nodig is om de limitatie in het eerste jaar te bereiken, kan gevonden worden door de lengte (gedimensioneerd in het eerste werkingsjaar) in te vullen in de aangepaste methode van Bernier uit Vergelijking (8.27) of (8.28) in het geval van respectievelijk een daling in basisbelasting of extra regeneratie. Door het lengteverschil tussen de lengte van het initiële veld met het nieuwe veld te nemen en dit te delen door de benodigde onbalansverandering, kan ook hier een boorveldreductie per eenheid energetische onbalans bekomen worden.

Vervolgens gaat het veld niet van grootte veranderen tot er een volledig gebalanceerd veld optreedt. Vanaf dat moment zal een verderzetting van een daling van de basisbelasting verwarming alsook een regeneratie met bijvoorbeeld zonnecollectoren nadelig zijn. Deze laatste twee zaken kunnen berekend worden met de hierboven beschreven methode.

8.4 Samenvatting boorveldreductie

In dit hoofdstuk staat beschreven hoe er, gegeven een willekeurig boorveld met belasting, reducties kunnen worden bepaald die maken dat het veld strikt monotoon in grootte daalt. De reden voor deze strikt monotome eis is dat dit de enige manier was om te verzekeren dat de splitsing van het optimalisatieprobleem in een boorveldkant en een technologiekant tot een optimale situatie zou leiden. Er zijn 4 regels die, mits gevolgd, maken dat het veld monotoon in grootte daalt. Binnen het kader van deze regels zijn dan ook verschillende reductiealgoritmes bedacht die zowel voor piek-, basis- als piek-basislimitaties het veld kunnen reduceren en dit zowel voor een zuivere als een gemengde belasting.

In Sectie 8.3 is tenslotte beschreven hoe het effect van een extra daling in basisbelasting of regeneratie op de boorveldgrootte in rekening kan worden gebracht. Dit effect wordt uitgedrukt in een verandering van boorveldlengte per eenheid energetische onbalans en is op die manier geschikt om in de lineaire optimalisatie gebruikt te worden om te oordelen of het verder reduceren van basisvermogen of regeneratie voordelig kan zijn.

Dit deel van het algoritme berekent dus welke mogelijke reducties er voor het veld zijn en wat voor elke reductie de mogelijkheden en invloeden zijn van regeneratie of een extra daling van de basisbelasting. Deze set aan mogelijkheden is de input van het lineaire programma dat beschreven staat in Hoofdstuk 9.

Hoofdstuk 9

Lineaire programmering

In dit hoofdstuk wordt het tweede deel van het globale optimalisatieprobleem besproken dat betrekking heeft op de verschillende externe technologieën. Het lineaire programma gaat beslissen of een bepaalde boorveldreductie economisch voordelig is, welke technologieën er geïnstalleerd moeten worden en welke belasting in piek en basis ze gaan krijgen.

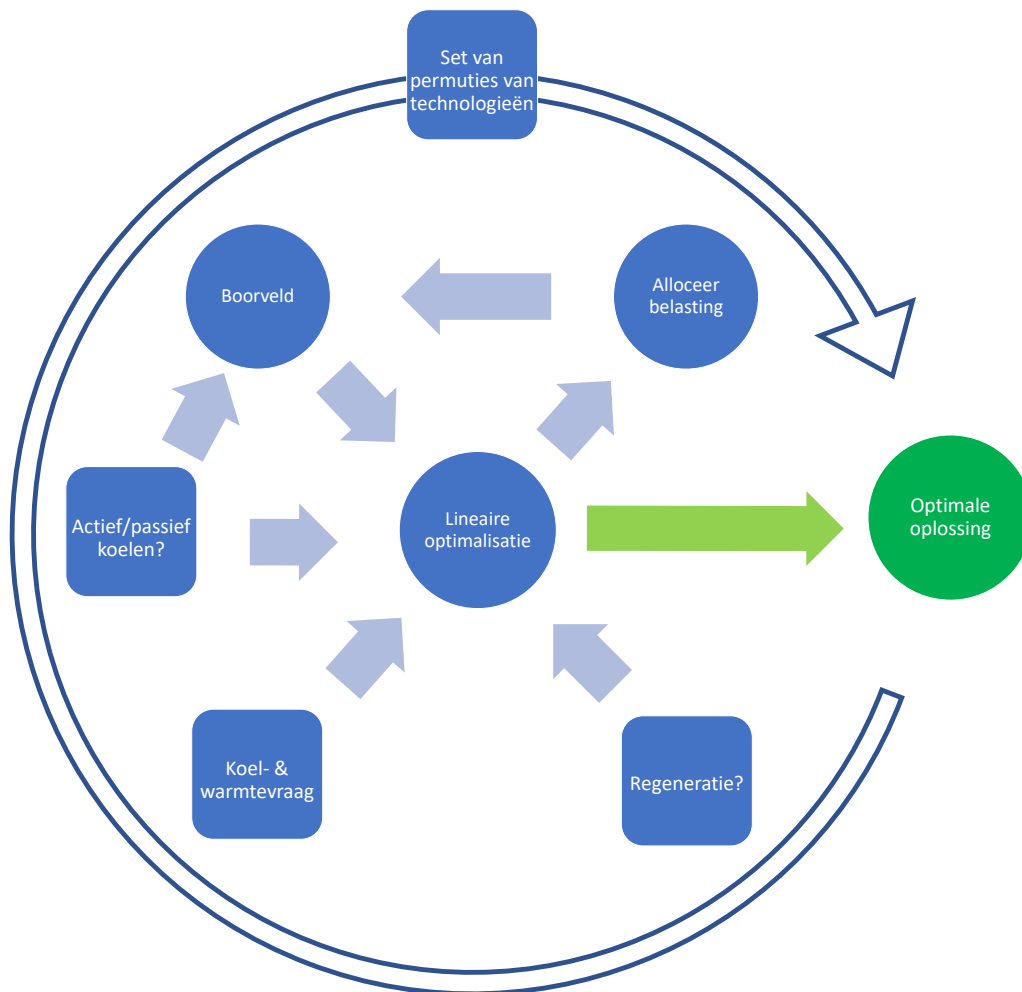
Dit hoofdstuk start in Sectie 9.1 met een bespreking van de schakel van het lineaire programma in het totale optimalisatieprobleem en in Sectie 9.2 wordt de ontwikkeling van het lineaire programma in verschillende stappen nader toegelicht.

9.1 Plaats in algoritme

In Figuur 9.1 is een schematische weergave te zien van de gehele optimalisatie, waarin de lineaire optimalisatie centraal staat. Deze lineaire optimalisatie krijgt vanuit het boorveld de mogelijke reducties binnen (zie Hoofdstuk 8) en gaat dan, gegeven een bepaalde koel- & warmtevraag voor het gebouw, na of er actief of passief gekoeld wordt en of er al dan niet rekening wordt gehouden met regeneratie, een hybride installatie dimensioneren. Nadien kan de kostprijs van het totale systeem bepaald worden.

Er wordt gestart met de situatie waarin de gehele koel- en warmtevraag op het veld rust. Vervolgens wordt het veld gedimensioneerd en worden de verschillende reductiemogelijkheden bekeken. Hiervoor wordt dan in het lineaire programma een optimale technologiecombinatie bepaald en wordt een kost berekend. Indien voor een gegeven reductie de kostprijs lager is dan die van de vorige iteratie, worden de verschillende belastingen gealloceerd aan de externe- en boorveldtechnologieën en wordt wederom het boorveld gedimensioneerd, rekening houdende met de temperatuurslimieten in de bodem¹. De cirkel wordt dan doorlopen tot er geen boorveldreductie meer is die een kostenbesparing betekent. Indien dit voor een set van permutaties

¹Deze zijn verschillend voor actief en passief koelen.



Figuur 9.1: Schematische weergave van de werking van de complete optimalisatie.

van technologieën wordt gedaan, wordt tenslotte een optimale oplossing gevonden.

Een belangrijk detail is wat er precies wordt verstaan onder 'set van permutaties van technologieën'. Dit staat beschreven in Sectie 9.1.1.

9.1.1 Set van permutaties van technologieën

Zoals al enkele malen werd aangehaald, wordt de investeringskost van elke technologie lineair voorgesteld. Echter hebben sommige van deze technologieën een vaste kost, die als een offset fungeert. Zo is bijvoorbeeld de kost van een airco gegeven door de betrekking

$$c(x) = 80.084x + 12456 \quad (9.1)$$

waarin x in $[kW]$ [21]. Indien de kostprijs als dusdanig in de optimalisatie wordt gestoken, moet er eigenlijk een threshold aan besparingen worden overwonnen alvorens het gerechtvaardigd is om een bepaalde technologie te installeren. Vaak is het echter pas zo dat na enkele iteraties een technologie economisch voordelig wordt. Dit probleem wordt verholpen door gebruik te maken van een set aan permutaties van technologieën en te werken met marginale investeringen.

Indien er geoptimaliseerd wordt met technologieën A, B, C en D, worden er eerst verschillende sets gevormd. De verschillende permutaties zijn: (A), (B), (C), (D), (A,B), (A,C), (A,D), (B,C), (B,D), (C,D), (A,B,C), (A,B,D), (B,C,D), (A,C,D), (A,B,C,D). Van elk van deze sets wordt de vaste investeringskost berekend en vervolgens wordt de optimalisatie voor elk van deze sets uitgevoerd met de marginale investeringskost (voor een airco $80.084\text{€}/kW$). Na de optimalisatie wordt de vaste kost hierbij opgeteld en wordt de totale kostprijs berekend van het systeem. Door dit voor alle sets te doen, kan uiteindelijk de set van technologieën gekozen worden die economisch het meest voordelig is.

Door echter op een intelligente manier door deze iteraties te gaan, kunnen mogelijks enkele opties geschrapt worden. Meer bepaald kunnen er twee gunstige zaken voorvallen

- Indien begonnen wordt met de meest volledige set (in deze (A,B,C,D)) en indien in de optimale oplossing technologie C niet gebruikt blijkt te zijn, is de oplossing van de set (A,B,C,D) gelijk aan deze van set (A,B,D) met vermindering van de vaste kost van technologie C. Er wordt dus altijd vanuit de meest volledige sets naar de kleinere toegewerkt om van dit principe zoveel mogelijk gebruik te kunnen maken.
- Een tweede voordeel dat kan plaatsgrijpen, is indien een van de technologieën geen vaste kosten heeft. Dit is bijvoorbeeld het geval in de gebruikte linearisatie van de investeringskost van een zonnecollector (zie Tabel 10.1, Hoofdstuk 10). Indien technologie D zo een technologie is, volgt hieruit dat elke set waarin D zit economischer of even economisch gaat zijn als de set waarin D niet zit. Stel dat de kost met set (A,D) wordt berekend en D wordt niet gebruikt, dan is deze kost exact gelijk aan die van set (A). Indien echter D wel wordt gebruikt, gaat de kost lager zijn dan de set waar enkel (A) aanwezig is, want er was een economisch voordeel om D te gebruiken. Indien zo een technologie in de totale set van technologieën aanwezig is, kan een groot aantal aan permutaties verwijderd worden wegens irrelevantie.

9.2 Opstellen lineair programma

In deze sectie wordt de uitwerking van het lineair programma beschreven. Een lineair programma maakt gebruik van een wiskundige formulering in termen van

een objectieffunctie (de te minimaliseren functie in dit geval) en een reeks aan randcondities, hetzij ongelijkheden, hetzij gelijkheden [36]. Nadien kan het probleem via gespecialiseerde algoritmes opgelost worden. Voorbeelden van zulke algoritmes zijn de Simplexmethode en de duale-simplexmethode ontwikkeld door Dantzig of de *Coin-or branch and cut*-methode [37, 38].

In deze thesis werd het lineair programma geïmplementeerd in Python met behulp van het gratis Pulp-package [39]. De solver die gebruikt werd, is de open source CBC-solver [38].

De algemene vorm van een lineair probleem ziet er als volgt uit

$$\begin{array}{ll}
 \text{minimaliseer} & c_1x_1 + c_2x_2 \quad \dots + c_nx_n \\
 \text{s.t.} & a_{11}x_1 + a_{12}x_2 \quad \dots + a_{1n}x_n \leq b_1 \\
 & a_{21}x_1 + a_{22}x_2 \quad \dots + a_{2n}x_n \leq b_2 \\
 & \vdots \\
 & a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 \quad \dots + a_{mn}x_n \leq b_m
 \end{array} \tag{9.2}$$

In de volgende secties wordt Stelsel (9.2) verder uitgewerkt voor het concrete probleem en systematisch complexer en meer volledig gemaakt. In Sectie 9.2.1 worden enkel de noodzakelijke maatregelen voor de boorveldreductie in rekening gebracht. In Sectie 9.2.2 en Sectie 9.2.3 staan vervolgens de aanpassingen van het programma beschreven die respectievelijk extra piekvermogen- en extra basisvermogenreducties mogelijk maken. Tenslotte handelt Sectie 9.2.4 over het in rekening brengen van regeneratie.

9.2.1 Enkele noodzakelijke maatregelen

Het algemene Stelsel (9.2) kan herschreven worden voor dit concrete geval als Vergelijking (9.3) tot en met (9.14). De verschillende vergelijkingen worden hieronder toegelicht.

- De objectieffunctie (9.3) sommeert over alle technologieën j de investeringskost (IK) en per maand i de werkingskost van technologie j ($WK_{i,j}$)² vermenigvuldigd met de energievraag ($E_{i,j}$) in maand i voor technologie j . Hierbij is nog de boorveldkost (BK) opgeteld, die een input is vanuit het boorveldreductiedeel (zie Hoofdstuk 8).
- Vergelijkingen (9.4) en (9.5) eisen dat respectievelijk de totale basiskoelvraag en piekkoeling door de som van alle koeltechnologieën k kan worden geleverd. Vergelijkingen (9.6) en (9.7) doen hetzelfde maar dan voor de verwarmingszijde.

²Deze is namelijk niet per definitie in elke maand gelijk. De werkingskost van bijvoorbeeld een lucht-waterwarmtepomp is een functie van de buitentemperatuur die van maand tot maand verschilt.

$$\begin{aligned}
 \text{minimaliseer} \quad & \sum_j \left[\sum_{i=1}^{12} E_{i,j} W K_{i,j} \right] + IK_j + BK & (9.3) \\
 \text{onderworpen aan} \quad & \sum_k E_{i,k} = E_{i,koel,tot}, & \forall i \quad (9.4) \\
 & \sum_k P_{i,k} = P_{i,koel,tot}, & \forall i \quad (9.5) \\
 & \sum_v E_{i,v} = E_{i,verw,tot}, & \forall i \quad (9.6) \\
 & \sum_v P_{i,v} = P_{i,verw,tot}, & \forall i \quad (9.7) \\
 & \sum_{ke} E_{i,ke} = E_{i,koel,red} + E_{i,koel,ext}, & \forall i \quad (9.8) \\
 & \sum_{ke} P_{i,ke} = P_{i,koel,red} + P_{i,koel,ext}, & \forall i \quad (9.9) \\
 & \sum_{ve} E_{i,ve} = E_{i,verw,red} + E_{i,verw,ext}, & \forall i \quad (9.10) \\
 & \sum_{ve} P_{i,ve} = P_{i,verw,red} + P_{i,verw,ext}, & \forall i \quad (9.11) \\
 & P_{i,j} \geq E_{i,j}/730, & \forall i, j \quad (9.12) \\
 & E_{i,j} \geq 0, & \forall i, j \quad (9.13) \\
 & IK_j \geq MIK_{i,j} P_{i,j}, & \forall i, j \quad (9.14)
 \end{aligned}$$

- Vergelijkingen (9.8) en (9.9) gelijken zeer sterk op de vorige, maar hebben exclusief betrekking op de reductie. Het boorvelddeel van de optimalisatie berekent namelijk welke reductie van vermogens er nodig is om het veld te reduceren. Deze te reduceren vermogens moeten wel exclusief door de externe technologieën worden opgevangen. Deze vergelijkingen eisen dus dat de externe koeltechnologieën (*ke*) zowel de basisbelasting als de piekbelasting die nodig is om het veld te kunnen reduceren, opvangen, alsook de basisbelastingen en piekvermogens van vorige reducties. Vergelijkingen (9.10) en (9.11) leggen dezelfde eis op aan de externe verwarmingstechnologieën (*ve*).
- Vergelijkingen (9.12) en (9.13) leggen voorwaarden op aan de piek- en basisbelastingen van de verschillende technologieën. Zo moet elk vermogen en elke energievraag groter of gelijk zijn aan nul (Vergelijking (9.13)) en moet het piekvermogen van technologie *j* in maand *i* minstens zo groot zijn als de gemiddelde maandbelasting.
- Tenslotte stelt Vergelijking (9.14) dat de investeringskost *IK* van technologie *j* groter of gelijk is aan het piekvermogen in elke maand van technologie *j* vermenigvuldigd met de marginale investeringskost *MIK* in die maand. We-

zenlijk komt dit neer op het berekenen van het maximale vermogen waarop de technologie gedimensioneerd moet worden.

Deze set aan vergelijkingen is reeds in staat een optimale combinatie van technologieën te maken en aan iedere technologie een concrete hoeveelheid vermogen en energie toe te kennen. Er zijn echter aanpassingen mogelijk die het geheel kostenefficiënter kunnen maken. Een eerste aanpassing is het in rekening brengen van een extra piekvermogenreductie. Dit is het onderwerp van Sectie 9.2.2.

9.2.2 Extra piekvermogenreductie

Zoals reeds in Hoofdstuk 8 werd aangehaald, heeft een piekvermogenreductie, volgens de gemaakte assumpties, geen effect op de temperatuur in de ondergrond. Een daling van het piekvermogen kan dan ook enkel een potentiële daling, maar nooit een stijging van het boorveld tot gevolg hebben. De vraag of het voordelig is het piekvermogen extra te laten dalen, is er dan ook een die bepaald wordt door de werkings- en investeringskosten. Aan de koelzijde zal het bijvoorbeeld nooit voordelig zijn om de nulwerkingskost van passief koelen te gaan vervangen door de airco, indien dit niet strikt noodzakelijk is voor een reductie in boorveldgrootte. Aan de verwarmingszijde zou het echter kunnen dat als een zonnecollector aanwezig is deze in alle maanden een deel van het piekvermogen van de GSHP overneemt, omdat de werkingskost van deze technologie lager is. Er wordt dan bespaard op energiekosten en potentieel op het boorveld³. Dit kan eenvoudig geïmplementeerd worden door Vergelijking (9.9) te vervangen door Vergelijking (9.15) en Vergelijking (9.11) door (9.16).

$$\sum_{ke} P_{i,ke} \geq P_{i,koel,red}, \quad \forall i \quad (9.15)$$

$$\sum_{ve} P_{i,ve} \geq P_{i,verw,red}, \quad \forall i \quad (9.16)$$

Hierin werd het gelijkheidsteken door een groter-danteken vervangen. Er kan dus nu meer piekvermogen gereduceerd worden dan strikt noodzakelijk voor de boorveldreductie indien dit qua operationele kosten voordelig is. De vraag kan gesteld worden of soortgelijke redenering niet ook geldt voor een extra reductie in basisbelasting. Dit is het onderwerp van Sectie 9.2.3.

9.2.3 Extra reductie basisbelasting

Evenals bij een extra piekreductie, kan een extra reductie van de basisbelasting economisch voordelig zijn op vlak van werkingskosten (bijvoorbeeld een zonnecollector die 'gratis' verwarmt). Het probleem is echter dat dit zijn repercussies heeft op de onbalans en daarom niet a priori voordelig (i.e. niet nadelig) is voor de grootte

³De besparing op het boorveld is in het lineair programma niet meegenomen, omdat dat eigenlijk niet relevant is. Als een bepaalde reductiemaatregel economisch voordelig is, gaat deze dat ook nog altijd zijn als er een surplus aan besparingen is. Zo is dit ook bij een extra daling van de piek.

van het boorveld, zoals dat bij de extra piekreductie uit Sectie 9.2.2 wel het geval was. Om hiermee rekening te houden, wordt er een extra boorveldbesparing (EBB) en een extra boorveldkost gedefinieerd (EBK). Hieronder staat vermeld hoe deze berekend kunnen worden.

Berekening van EBB en EBK

In Sectie 8.3 staat beschreven hoe het effect van een extra basisdaling (of ook regeneratie zie Sectie 9.2.4) op de boorveldgrootte in rekening kan worden gebracht. Per reductiemogelijkheid beschikt het lineair programma over deze data. De kosten van een extra basisdaling kunnen gemodelleerd worden door vier extra variabelen in het leven te roepen: EBB_v en EBB_k voor een extra boorveldbesparing ten gevolge van een daling in verwarming of koeling en een EBK_v en EBK_b voor een extra boorveldkost ten gevolge van een extra daling in basisbelasting van verwarming of koeling. De som van EBB_v en EBB_k is dan de totale boorveldbesparing EBB en hetzelfde geldt voor EBK . Er kan een onderscheid gemaakt worden tussen drie verschillende gevallen voor de bepaling van deze parameters. Zowel een extra daling in basisbelasting koeling als een daling in basisbelasting verwarming bevinden zich in één van deze drie gevallen.

Altijd kost In sommige gevallen is een daling van de basisbelasting altijd nadelig voor de veldgrootte en gaat dit altijd voor een extra kost zorgen. Een voorbeeld is een veld in toestand CC⁴ waarvan de basisbelasting verwarming daalt. In dat geval geldt dat

$$EBB_v = 0 \quad (9.17)$$

$$EBK_v = \zeta_v \sum_i \sum_{ve} E_{i,ve,extra} \quad (9.18)$$

waarin $E_{i,ve,extra}$ de extra hoeveelheid basisbelasting verwarming is van technologie ve in maand i en ζ_v de boorveldkost per eenheid energie van de extra externe verwarming is (zie Sectie 8.3).

Eerst noch kost, noch besparing, dan extra kost Deze situatie treedt op wanneer het veld in het eerste jaar gelimiteerd is (zie Sectie 8.3). Wanneer het veld bijvoorbeeld in een HC-toestand zit (zoals in Figuur 8.22, Pagina 73), zal een daling van de basisbelasting eerst geen en nadien een nadelig effect op de kostprijs hebben. Voor bijvoorbeeld het geval van een daling van de basisbelasting verwarming kan worden gezegd dat

⁴Koelvraaggedomineerd en -gelimiteerd.

$$EBB_v = 0 \quad (9.19)$$

$$EBK_v \geq 0 \quad (9.20)$$

$$EBK_v \geq \zeta_v \left[\sum_i \sum_{ve} E_{i,ve,extra} - \Phi_v \right] \quad (9.21)$$

Deze worden gesommeerd omdat slechts op jaarbasis wordt gekeken naar hoe de onbalans verandert. Φ_v is de thresholdwaarde waarboven een extra kost optreedt (zie Sectie 8.3). Het is belangrijk dat er hier een extra voorwaarde op EBK_v wordt gesteld, omdat anders, indien er geen extra basisreductie is, er een negatieve boorveldkost zou bijkomen. Daarom zijn de twee voorwaarden op EBK_v op die manier opgesteld dat de kost altijd groter is dan nul en gelijk aan de extra kost indien de thresholdwaarde wordt overschreden.

Eerst besparing, dan neutraal en dan extra kost Indien een boorveld zich in een CC-toestand bevindt, zal een daling van de basisbelasting koeling eerst leiden tot een besparing op het veld, nadien tot een nuloperatie om vervolgens te eindigen met een extra kost. Er is in dit geval dus sprake van twee thresholdwaarden: een threshold met betrekking tot de besparing en een threshold met betrekking tot de extra kost. Mathematisch kan dit geformuleerd worden als (dit keer voor het geval het een basisdaling van de koeling betreft)

$$EBB_k \leq \Theta_k \sum_i \sum_{ke} E_{i,ke,extra} \quad (9.22)$$

$$EBB_k \leq \Theta_k \Lambda_k \quad (9.23)$$

$$EBK_k \geq 0 \quad (9.24)$$

$$EBK_k \geq \zeta_k \left[\sum_i \sum_{ke} E_{i,ke,extra} - \Phi_k \right] \quad (9.25)$$

waarin Θ_k een besparing op het boorveld is per eenheid energie die extra naar de basisbelasting van de externe koeling gaat en Λ_k de thresholdwaarde vanaf wanneer er geen extra besparing meer is. De potentiële boorveldbesparing EBB_k is dus gelimiteerd tot $\Lambda_k \Theta_k$. Voor de extra boorveldkost kan de redenering van hierboven worden gevolgd.

De Vergelijkingen (9.22) tot en met (9.25) zijn de meest volledige set van randvoorwaarden voor de extra boorveldkosten en -besparingen. De andere twee situaties kunnen ook hierop geijkt worden als volgt.

- Altijd kost: $\Theta_v = \Theta_k = 0$ en $\Phi_v = \Phi_k = 0$
- Eerst noch kost, noch besparing, dan extra kost: $\Theta_v = \Theta_k = 0$

Als deze vergelijkingen worden toegepast, kan het geheel lineair probleem herschreven worden als Vergelijking (9.26) tot en met Vergelijking(9.47)⁵.

9.2.4 Regeneratie

Een laatste uitbreiding van het algoritme kan gedaan worden door de mogelijkheid van regeneratie in rekening te brengen. Net zoals een extra daling van de basisbelasting, heeft dit een effect op de grootte van het veld en moet dit gecompenseerd worden door extra boorveldkosten en/of -besparingen. Een ander aspect is dat regeneratie ook kan bijdragen aan de reductie die nodig is om een boorveld te verkleinen. Dit kan begrepen worden als volgt. Indien in maand i het boorveld $100kWh$ in basisbelasting zou moeten dalen (dit volgt bijvoorbeeld uit de analyse van Hoofdstuk 8), dan moest dit initieel gebeuren door die $100kWh$ op een externe installatie te zetten.

Indien echter regeneratie mee in rekening wordt genomen, is er mogelijk een andere oplossing. Stel dat in maand i evenzeer regeneratie aanwezig was door zonnecollectoren. Zoals reeds in Sectie 8.3 werd aangehaald, heeft dit hetzelfde schijnbare effect als een basisbelasting koeling. Er zou dus om de reductie van $100kWh$ te bewerkstelligen ook kunnen geopteerd worden voor een daling van de regeneratie in plaats van een daling van de basisbelasting koeling.

Dit zijn twee aspecten die een aanpassing van het lineaire programma vragen. In de volgende twee secties worden deze aspecten nader besproken.

Berekening van EBB en EBK

De berekening van de extra boorveldkosten en -besparingen met inbegrip van regeneratie is complexer dan als de optimalisatie enkel rekening hield met een extra basisreductie. Het concrete probleem is dat zowel een regeneratie als een daling in basisbelasting hetzelfde effect kunnen hebben op het boorveld. Zo zal een daling in basisbelasting koeling hetzelfde effect hebben als een regeneratie met een droge koeler (zie Sectie 8.3). Dit effect is echter niet exact hetzelfde. Regeneratie gaat namelijk een groter effect op de boorveldgrootte hebben dan een daling van de basisbelasting⁶ waardoor beiden niet zomaar optelbaar zijn (zie ook Sectie 8.3).

Hieronder worden drie mogelijke aanpakken besproken om regeneratie in rekening te brengen. Een eerste aanpak is een theoretische uitwerking, die een correct resultaat weergeeft, maar een niet-lineaire vergelijking aan het systeem toevoegt, meer bepaald een bilinaire vergelijking [40]. De gebruikte CBC-solver kan hier echter niet mee overweg, maar een solver als Gurobi zou dit bijvoorbeeld wel kunnen oplossen [41].

⁵Merk op dat de notatie $EBK_{v,k}$ impliceert dat $EBK = EBK_v + EBK_k$ en dat $\sum_{i,j} = \sum_i \sum_j$.

⁶Dit is omdat regeneratie de gemiddelde maandbelasting van verwarming/koeling gaat laten stijgen. Een vermindering van de basisbelasting gaat zorgen voor een daling van de maandbelasting. Omdat er gewerkt wordt met superpositie van thermische pulsen heeft regeneratie dus een sterker effect (zie Sectie 8.3).

$$\text{minimaliseer} \quad \sum_j \left[\sum_{i=1}^{12} E_{i,j} W K_{i,j} \right] + I K_j + B K + E B K_{v,k} - E B B_{v,k} \quad (9.26)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_k E_{i,k} = E_{i,koel,tot}, \quad \forall i \quad (9.27)$$

$$\sum_k P_{i,k} = P_{i,koel,tot}, \quad \forall i \quad (9.28)$$

$$\sum_v E_{i,v} = E_{i,verw,tot}, \quad \forall i \quad (9.29)$$

$$\sum_v P_{i,v} = P_{i,verw,tot}, \quad \forall i \quad (9.30)$$

$$\sum_{ke} E_{i,ke,red} = E_{i,koel,red} + E_{i,koel,ext}, \quad \forall i \quad (9.31)$$

$$\sum_{ke} P_{i,ke} \geq P_{i,koel,red} + P_{i,koel,ext}, \quad \forall i \quad (9.32)$$

$$\sum_{ve} E_{i,ve,red} = E_{i,verw,red} + E_{i,verw,ext}, \quad \forall i \quad (9.33)$$

$$\sum_{ve} P_{i,ve} \geq P_{i,verw,red} + P_{i,verw,ext}, \quad \forall i \quad (9.34)$$

$$P_{i,j} \geq E_{i,j}/730, \quad \forall i, j \quad (9.35)$$

$$E_{i,j} \geq 0, \quad \forall i, j \quad (9.36)$$

$$I K_j \geq M I K_{i,j} P_{i,j}, \quad \forall i, j \quad (9.37)$$

$$E_{i,ke} = E_{i,ke,red} + E_{i,ke,extra}, \quad \forall i, ke \quad (9.38)$$

$$E_{i,ve} = E_{i,ve,red} + E_{i,ve,extra}, \quad \forall i, ve \quad (9.39)$$

$$E B K_k \geq \zeta_k \left[\sum_{ke,i} E_{i,ke,extra} - \Phi_k \right] \quad (9.40)$$

$$E B K_k \geq 0 \quad (9.41)$$

$$E B B_k \leq \Theta_k \sum_{ke,i} E_{i,ke,extra} \quad (9.42)$$

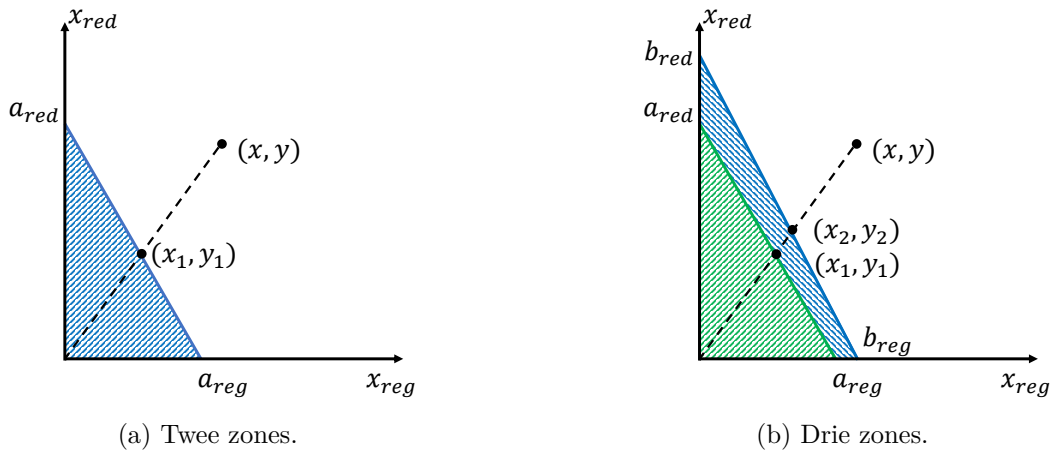
$$E B K_k \leq \Theta_k \Lambda_k \quad (9.43)$$

$$E B K_v \geq \zeta_v \left[\sum_{ve,i} E_{i,ve,extra} - \Phi_v \right] \quad (9.44)$$

$$E B K_v \geq 0 \quad (9.45)$$

$$E B B_v \leq \Theta_v \sum_{ve,i} E_{i,ve,extra} \quad (9.46)$$

$$E B K_v \leq \Theta_v \Lambda_v \quad (9.47)$$



Figuur 9.2: Illustratie bij de theoretische bepaling van de extra boorveldkost en -besparing.

De tweede aanpak bestaat erin om de theoretische uitwerking te discretiseren en op die manier een set van lineaire vergelijkingen te bekomen. Welke vergelijkingen van toepassing zijn, kan dan door een *Big M*-methode bepaald worden [42]. Er wordt dan een lineair programma met gemengde integers (MILP) bekomen. Dit leidde echter tot numerieke instabiliteiten, waardoor voor de derde optie werd geopteerd.

In de laatste optie worden de effecten van regeneratie en basisbelastingdaling toch samengenomen en wordt een gemiddelde van de kost- en thresholdwaarden berekend.

Theoretische uitwerking Voor de theoretische uitwerking van de kosten, wordt verwezen naar Figuur 9.2. In deze figuur staat de groene zone voor een besparing in boorveldgrootte en een blauwe zone voor noch een besparing, noch een kost. De assen zijn x_{red} en x_{reg} bijvoorbeeld een reductie in basisbelasting koeling en een regeneratie door koeltechnologieën, daar deze hetzelfde effect op het boorveld hebben⁷. Verder slaan a_{red} , b_{red} , a_{reg} en b_{reg} op de verschillende thresholds die de zones afbakenen (zie ook Sectie 9.2.3). De centrale vraag is wat in het punt (x, y) de extra kost/besparing is.

Er wordt eerst gekeken naar het geval van Figuur 9.2(a). Voor elk punt in de blauwe driehoek, is er geen extra kost, noch besparing. Voor het punt buiten deze driehoek, is de kost c in het punt (x, y) te vinden als

$$c(x, y) = xc_{reg} + yc_{red} - x_1c_{reg} - y_1c_{red} \quad (9.48)$$

waarin c_{reg} en c_{red} respectievelijk de kost per eenheid regeneratie en extra basisreductie zijn die volgen uit het boorvelddeel van het probleem (zie Sectie 8.3). Het

⁷Een reductie in basisbelasting koeling maakt dat het veld minder wordt opgewarmd (koeling injecteert warmte in de grond) en dus afkoelt. Een regeneratie door koeltechnologieën koelt de grond actief af. Het valt dus op dat beide hetzelfde effect op de bodemtemperatuur hebben.

punt (x_1, y_1) kan gevonden worden door de rechte te bepalen tussen de thresholds a_{red} en a_{reg} . Deze is gegeven door

$$a_{red}a_{reg} = a_{red}x_{reg} + a_{reg}x_{red} \quad (9.49)$$

Het punt (x_1, y_1) kan dan gevonden worden door het snijpunt te nemen van de rechte die het punt (x, y) met de oorsprong verbindt met de rechte die de zone afbakent.

$$x_1 = \frac{a_{red}}{\frac{y}{x} + \frac{a_{red}}{a_{reg}}} \quad (9.50)$$

$$y_1 = a_{red} - \frac{a_{red}}{a_{reg}} \frac{a_{red}}{\frac{y}{x} + \frac{a_{red}}{a_{reg}}} \quad (9.51)$$

Door bovenstaande vergelijkingen in te vullen in Vergelijking (9.48) kan de kostprijs voor elk punt (x, y) buiten de blauwe zone bepaald worden.

Voor het geval van Figuur 9.2(b) is er nog een extra zone van toepassing. Allereerst is de besparing in de groene zone gewoon een som van de besparingen ten gevolge van regeneratie en extra basisreductie. De blauwe zone voegt geen extra kost noch besparing toe en aldus is de totale besparing gelijk aan de besparing in het punt (x_1, y_1) en dit kan op de bovenstaande manier worden berekend. Voor de punten die in geen beider zones vallen, geldt dat de kostprijs in een punt (x, y) gegeven wordt door Vergelijking (9.52).

$$c(x, y) = xc_{reg} + yc_{red} - x_1b_{reg} - y_1b_{red} - x_2c_{reg} - y_2c_{red} \quad (9.52)$$

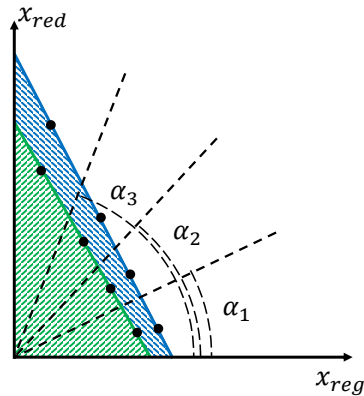
waarin b_{red} en b_{reg} staan voor de thresholdwaarden in de blauwe zone voor respectievelijk een reductie van basisbelasting of een regeneratie. Voor gevallen buiten de blauwe zone kunnen, door wederom de rechte op te stellen die deze zone afbakent, de punten (x_1, y_1) en (x_2, y_2) berekend worden met behulp van vergelijkingen

$$x_1 = \frac{a_{red}}{\frac{y}{x} + \frac{a_{red}}{a_{reg}}} \quad (9.53)$$

$$y_1 = a_{red} - \frac{a_{red}}{a_{reg}} \frac{a_{red}}{\frac{y}{x} + \frac{a_{red}}{a_{reg}}} \quad (9.54)$$

$$x_2 = \frac{b_{red}}{\frac{y}{x} + \frac{b_{red}}{b_{reg}}} \quad (9.55)$$

$$y_2 = b_{red} - \frac{b_{red}}{b_{reg}} \frac{b_{red}}{\frac{y}{x} + \frac{b_{red}}{b_{reg}}} \quad (9.56)$$



Figuur 9.3: Illustratie voor een discretisatie van het regeneratie-reductievlak.

Door deze vergelijkingen in te vullen in Vergelijking (9.52) kan de kost in elk punt buiten de gekleurde zones berekend worden.

Het valt echter op dat deze vergelijkingen een niet-lineariteit hebben door de deling van x en y . Dit maakt dat het niet zonder meer in het lineaire programma kan worden opgenomen. Het is daarom nodig vereenvoudigingen aan dit theoretische model aan te brengen. Een mogelijkheid bestaat erin om het kwadrant gevormd tussen de positieve assen x_{reg} en x_{red} te gaan discretiseren in een aantal hoeken of om aan te nemen dat het verschil tussen regeneratie en basisreductie relatief klein is zodat beide opgeteld kunnen worden. Beide mogelijkheden worden hieronder besproken.

Discretisatie en *Big M* Het probleem met de theoretische afleiding is het voorkomen van een niet-lineariteit door de deling van de parameters x en y . Dit kan verholpen worden door het veld, opgespannen door assen x_{reg} en x_{red} , onder te verdelen in regionen. Dit is weergegeven in Figuur 9.3, waarin geopteerd is voor 4 regionen van ieders 22.5° , aangeduid door de hoeken α_1 , α_2 en α_3 .

Ieder van deze regionen heeft een vaste waarde voor de punten (x_1, y_1) en (x_2, y_2) in het midden van de regio. Deze punten kunnen op voorhand berekend worden. Het volstaat nadien om voor elk punt (x, y) te bepalen in welke regio het ligt en dan Vergelijking (9.52) te gebruiken waarin de punten (x_1, y_1) en (x_2, y_2) de voorberekende punten zijn in de specifieke regio.

Bepalen in welke hoek een bepaald punt ligt, is mogelijk indien gebruik wordt gemaakt van de *Big M*-methode. Dit wordt geïllustreerd voor zone 2, i.e. de zone waarvoor geldt dat $> \alpha_1$ en $< \alpha_2$. Er moeten dus twee logische testen worden uitgevoerd. De test om te bepalen of een ongelijkheid $a > b$ opgaat, kan met de *Big M*-methode geschreven worden als

$$a \leq b \Leftrightarrow \delta = 1 \quad (9.57)$$

waarin δ een binaire variable is [42]. Vergelijking (9.57) kan vervolgens geschreven worden als het lineair stelsel

$$b \geq a - M(1 - \delta) \quad (9.58)$$

$$b \leq a + M\delta \quad (9.59)$$

met M een groot getal. In concreto moet er hier getest worden of

$$tg(\alpha_1) < \frac{y}{x} < tg(\alpha_2) \quad (9.60)$$

Vergelijking (9.60) bevat twee logische testen en er zullen aldus twee *Big M*-methodes moeten worden toegepast met δ_1 de check voor de ene ongelijkheid en δ_2 de controle op de andere. Deze twee moeten samen genomen worden in een logische AND die als volgt kan worden geïmplementeerd in een MILP-programma

$$y = \delta_1 \wedge \delta_2 \Leftrightarrow \begin{cases} y & \geq \delta_1 + \delta_2 - 1 \\ y & \leq \delta_1 \\ y & \leq \delta_2 \end{cases} \quad (9.61)$$

De moeilijkheid van deze implementatie bestaat erin dat een M gekozen moet worden die groter is dan de getalwaarden waarmee ze vergelijkt, maar eveneens zo klein mogelijk moet zijn [43]. Omdat in dit geval de *Big M*-methode ook gebruikt zou moeten worden om de verschillende zones te bepalen (blauwe, groene of elders), moet de M dus groter zijn dan het product van a_{red} en a_{reg} . Dit kan een getal worden in de orde van 10^8 , maar anderzijds kan dit soms slechts 10^2 zijn. Een M -waarde kiezen die werkt in alle gevallen, is zeer moeilijk en leidde altijd tot numerieke instabiliteiten met de gebruikte solver. Daarom wordt er voor een verdere vereenvoudiging geopteerd die hieronder staat verduidelijkt.

Uiteindelijke implementatie In de uiteindelijke implementatie wordt gesteld dat het verschil in kost of besparing door enerzijds regeneratie en anderzijds een reductie in basisbelasting, nagenoeg gelijk zijn en beide dus samengenomen kunnen worden. Vergelijkingen (9.22) tot en met (9.25) kunnen dan herschreven worden als

$$EBB_k \leq \Theta_k \sum_i \sum_{ke} E_{i,ke,extra} + E_{i,ke,re} \quad (9.62)$$

$$EBB_k \leq \Theta_k \Lambda_k \quad (9.63)$$

$$EBK_k \geq 0 \quad (9.64)$$

$$EBK_k \geq \zeta_k \left[\sum_i \sum_{ke} E_{i,ke,extra} + E_{i,ke,re} - \Phi_k \right] \quad (9.65)$$

waarin de ζ_k , Θ_k , Λ_k en Φ_k een gemiddelde zijn van deze individuele parameters voor een basisveldreductie en regeneratie. Verder staat het subscript *re* voor 'regeneratie extra'.

Regeneratiereductie

Zoals hierboven al werd aangegeven, kan een reductie in regeneratie gebruikt worden naast een basisbelastingsdaling om een vereiste boorveldreductie door te voeren. Vergelijkingen (9.31) en (9.33) kunnen dan herschreven worden als

$$\sum_{ke} E_{i,ke,red} + \sum_{ve} E_{i,ve,rr} = E_{i,koel,red}, \quad \forall i \quad (9.66)$$

$$\sum_{ve} E_{i,ve,red} + \sum_{ke} E_{i,ke,rr} = E_{i,verw,red}, \quad \forall i \quad (9.67)$$

$$\sum_{ve} E_{i,ve,rr} + E_{i,ve,reg} = E_{i,verw,reg}, \quad \forall i \quad (9.68)$$

$$\sum_{ke} E_{i,ke,rr} + E_{i,ke,reg} = E_{i,koel,reg}, \quad \forall i \quad (9.69)$$

waarbij het subscript rr staat voor een reductie in regeneratie. Het is ook nodig om ervoor te zorgen dat de regeneratie uit de vorige iteratiestap nu ook behouden blijft. Daarvoor zorgen Vergelijking (9.68) en (9.69) die maken dat de totale regeneratie $E_{i,verw,reg}$ opgevangen wordt door zowel de reductie in regeneratie als de regeneratie van alle technologieën ve .

Het volledige lineaire programma is dan te vinden van Vergelijking (9.70) tot en met (9.95).

9.2.5 Alloceren van de belasting

Nadat de lineaire optimalisatie de optimale verdeling van de belastingen heeft bepaald, worden deze tenslotte allemaal aan de juiste technologieën toegekend. Nadien wordt berekend hoeveel belasting er naar het boorveld gaat via de technologieën van passief koelen, GSHP of eventueel ook regeneraties.

$$\text{minimaliseer } \sum_j \left[\sum_{i=1}^{12} E_{i,j} W K_{i,j} \right] + IK_j + BK + EBK_{v,k} - EBB_{v,k} \quad (9.70)$$

$$\text{s.t. } \sum_k E_{i,k} = E_{i,koel,tot}, \quad \forall i \quad (9.71)$$

$$\sum_k P_{i,k} = P_{i,koel,tot}, \quad \forall i \quad (9.72)$$

$$\sum_v E_{i,v} = E_{i,verw,tot}, \quad \forall i \quad (9.73)$$

$$\sum_v P_{i,v} = P_{i,verw,tot}, \quad \forall i \quad (9.74)$$

$$\sum_{ke} E_{i,ke,red} + \sum_{ve} E_{i,ve,rr} = E_{i,koel,red} + E_{i,koel,ext}, \quad \forall i \quad (9.75)$$

$$\sum_{ke} P_{i,ke} \geq P_{i,koel,red} + P_{i,koel,ext}, \quad \forall i \quad (9.76)$$

$$\sum_{ve} E_{i,ve,red} + \sum_{ke} E_{i,ke,rr} = E_{i,verw,red} + E_{i,verw,ext}, \quad \forall i \quad (9.77)$$

$$\sum_{ve} P_{i,ve} \geq P_{i,verw,red} + P_{i,verw,ext}, \quad \forall i \quad (9.78)$$

$$P_{i,j} \geq E_{i,j}/730, \quad \forall i, j \quad (9.79)$$

$$E_{i,j} \geq 0, \quad \forall i, j \quad (9.80)$$

$$IK_j \geq MIK_{i,j} P_{i,j}, \quad \forall i, j \quad (9.81)$$

$$E_{i,ke} = E_{i,ke,red} + E_{i,ke,extra}, \quad \forall i, ke \quad (9.82)$$

$$E_{i,ve} = E_{i,ve,red} + E_{i,ve,extra}, \quad \forall i, ve \quad (9.83)$$

$$EBK_k \geq \zeta_k \sum_{ke,i} E_{i,ke,extra} - \Phi_k \zeta_k \quad (9.84)$$

$$EBK_k \geq 0 \quad (9.85)$$

$$EBB_k \leq \Theta_k RB_k \quad (9.86)$$

$$EBK_k \leq \Theta_k \Lambda_k \quad (9.87)$$

$$EBK_v \geq \zeta_v RB_v - \Phi_v \zeta_v \quad (9.88)$$

$$EBK_v \geq 0 \quad (9.89)$$

$$EBB_v \leq \Theta_v \sum_{ve,i} E_{i,ve,extra} \quad (9.90)$$

$$EBK_v \leq \Theta_v \Lambda_v \quad (9.91)$$

$$\sum_{ve} E_{i,ve,rr} + E_{i,ve,reg} = E_{i,verw,reg}, \quad \forall i \quad (9.92)$$

$$\sum_{ke} E_{i,ke,rr} + E_{i,ke,reg} = E_{i,koel,reg}, \quad \forall i \quad (9.93)$$

$$RB_k = \sum_{ve,i} E_{i,ve,rr} + \sum_{ke,i} E_{i,ke,reg} \quad (9.94)$$

$$RB_v = \sum_{ke,i} E_{i,ke,rr} + \sum_{ve,i} E_{i,ve,reg} \quad (9.95)$$

Deel III

Resultaten en conclusies

Resultaten en conclusies

“Don’t look for facts and research to fit your narrative; build a story out of what you find.”

— Brendan Wolfe, Auteur

In dit laatste deel worden de casestudies uit Hoofdstuk 4 door het algoritme gestuurd en worden de resultaten besproken. Er wordt ingegaan op hoe deze resultaten overeenstemmen met de verwachtingen uit de voorstudie en welke extra conclusies er genomen kunnen worden. Dit gaat het onderwerp zijn van Hoofdstuk 10. Wegens de beperkte tijd, is het niet mogelijk geweest alles te onderzoeken en tijdens het onderzoek zijn er ook vele vragen gerezen. Mogelijke pistes voor verder onderzoek staan opgelijst in Hoofdstuk 11. Tenslotte eindigt deze verhandeling met een algehele conclusie in Hoofdstuk 12.

Dit deel zal dus een antwoord geven op de vraag: *Zijn er leerrijke resultaten die getrokken kunnen worden uit de ontwikkelde methode indien ze toegepast wordt op enkele concrete gevallen?*

Hoofdstuk 10

Resultaten

In dit hoofdstuk wordt teruggekomen op de analyse van de casestudies uit Hoofdstuk 4. Na een grondige studie in het vorige deel van de werking van het boorveld en hoe een optimale combinatie van technologieën kan worden bekomen, zijn nu alle tools voorhanden om de vermoedens vanuit de casestudies af te toetsen.

In Sectie 10.1 worden alle gebruikte kosten, temperaturen, zonnefluxen en andere assumpties voorgesteld die in zowel het koelvraaggedomineerde als het warmtevraaggedomineerde geval geldig zijn. Vervolgens worden in Sectie 10.2 en in Sectie 10.3 de resultaten voor respectievelijk het koelvraaggedomineerde als het warmtevraaggedomineerde geval besproken. Het effect van actief koelen wordt tenslotte kort besproken in Sectie 10.4.

10.1 Gebruikte technologieën en algemene assumpties

In deze sectie staan alle gegevens opgelijst die gebruikt zijn om de berekeningen in de volgende secties uit te voeren. Tabel 10.1 bevat alle lineaire kostcurves van de technologieën die in rekening zijn gebracht alsook de elektriciteits- en gasprijzen. Tabel 10.2 is een herneming van Tabel 4.2 waarin alle parameters staan die relevant zijn bij de berekening van het boorveld.

Sommige technologieën zoals de droge koeler, zonnecollector en lucht-waterwarmtepomp behoeven extra meteorologische data. Deze zijn te vinden in Tabel 10.3, waarin de meteorologische gegevens voor Ukkel (België) staan vermeld [45]. Er is gekozen om met de normwaarden te werken, om eventuele jaarlijkse extrema niet mee in rekening

¹Gegevens met dank aan Ingenium N.V. (Brugge, België) en Boydens Engineering (Zedelgem, België).

²Voor een zonnecollector dient er naast de kost van de panelen ook nog een 50-100l buffervat te worden voorzien. De kost hiervoor loopt van een lage kwaliteit van 1euro/l tot 2.5 euro/l voor een hoge kwaliteit van buffervat. In deze thesis worden gemiddelde waardes genomen (75l aan 1.75 euro/l) waardoor 681.25 wordt bekomen. (Gegevens met dank aan Boydens Engineering (Zedelgem, België)).

³Bij actief koelen werd een COP van 3 verondersteld.

10.1. Gebruikte technologieën en algemene assumpties

Technologie	Kostprijs	Bereik	Extra info
Gasketel	$85,405x + 9451$	$x \in [25, 800][kW]$	COP = 5
Grondwarmtepomp	$83,368x + 11725$	$x \in [34, 300][kW]$	
Passief koelen	$14,421x + 1814$	$x \in [28, 472][kW]$	
Airco	$80,084x + 12456$	$x \in [21, 1335][kW]$	COP = 3
Droge koeler ¹	$66,851x + 4322,02$	$x \in [25, 200][kW]$	
Zonnecollector ²	$681,25x$	$x[m^2]$	
Lucht-water-warmtepomp	$84,337x + 11780,5$	$x \in [30, 150][kW]$	
Boorveld	$32,0x$	$x[m\text{diepte}]$	10 x 12 boorgaten
Elektriciteit	0.1466[€/kWh]		
Gasprijs	0.0464[€/kWh]		

Tabel 10.1: Kostenfuncties voor de verschillende gebruikte technologieën [21, 44].

Fluidumparameters	
Thermische conductiviteit	$0.513 \frac{W}{mK}$
Specifieke warmtecapaciteit	$4000 \frac{J}{kgK}$
Dichtheid	$1060 \frac{kg}{m^3}$
Viscositeit	$1,79 \frac{g}{ms}$
Maximumtemperatuur (Passief koelen)	16°C
Maximumtemperatuur (Actief koelen ³)	25°C
Minimumtemperatuur	0°C
Massadebiet	$4 \frac{l}{s}$
Grondparameters	
Thermische conductiviteit	$3,5 \frac{W}{mK}$
Soortelijke warmte	$2,4 \frac{MJ}{m^3K}$
Temperatuur aardoppervlak	10°C
Boorgatparameters	
Type	Enkele U-buis
Boorgatpatiëring	6.5m
Boorgatstraal	75mm
Binnenstraal leiding	13mm
Buitenstraal leiding	16,7mm
Center-tot-centerafstand leidingen	62mm
Thermische conductiviteit van de leiding	$0.4 \frac{W}{mK}$
Thermische conductiviteit van de vulling	$1.0 \frac{W}{mK}$
Contactweerstand	$0.0 \frac{mK}{W}$
Resulterende boorgatweerstand	$0.2 \frac{mK}{W}$

Tabel 10.2: Parameters met betrekking tot de dimensionering van het boorveld.

te nemen. Omdat echter het klimaat opwarmt, is het mogelijk dat deze normwaarden gedurende de studieperiode van 20 jaar veranderen. Hier wordt later op teruggekomen.

Voor de lucht-waterwarmtepomp is geopteerd voor een lineaire COP-curve in functie van de temperatuur. De uitdrukking is te vinden in Vergelijking (10.1), waarin een constante condensoruitlaat van 35°C werd verondersteld [46].

$$COP = 3.4 + 0.064T_{omg} \quad (10.1)$$

In deze betrekking is voor T_{omg} [°C] de gemiddelde temperatuur genomen (zie Tabel 10.3).

Voor de droge koeler is er met een thresholdtemperatuur gewerkt van 10°C voor regeneratie en 12°C voor overdag. Deze getallen zijn bekomen door een $\Delta T = 3^\circ\text{C}$ te veronderstellen tussen de omgevingstemperatuur en de uitlaat van de droge koeler. Over het boorveld staat ook ongeveer een $\Delta T = 3^\circ\text{C}$ en met een maximumtemperatuur van 16°C voor het boorveld (zie Tabel 10.2) volgt dan dat de omgevingstemperatuur maximum 10°C mag zijn. Omdat dit enkel het geval is voor regeneratie, wordt hier gebruik gemaakt van de gemiddelde minimumtemperaturen⁴.

Voor gebruik overdag geldt dat een temperatuur van 12°C als maximum geldt. Hiervoor werd dezelfde $\Delta T = 3^\circ\text{C}$ als hierboven genomen en werd de veronderstelling gemaakt dat het koelwater een temperatuur van 15°C moet hebben.

Tenslotte is de assumptie gemaakt dat de werkingskosten van passief koelen en van de zonnecollectoren verwaarloosbaar zijn, daar deze enkel het elektrisch verbruik van een circulatiepomp hebben. Bij de andere technologieën volgt het verband tussen de werkingskost en de belasting rechtstreeks of uit de COP. Voor de droge koeler ligt dit net iets anders. De werkingskost is hier afhankelijk van het vermogen van de ventilator die geïnstalleerd is. Uit de datafiche van de VFL 242 HX droge koeler is afgeleid dat er $0.0367kWh_e/kWh_{th}$ nodig is, waarbij de kWh_e staat voor de elektrische energie van de ventilator en de kWh_{th} de thermische energie is [9].

In de verdere secties gaat tenslotte gebruik gemaakt worden van combinaties van technologieën. Deze combinaties zijn weergegeven in Tabel 10.4.

10.2 Resultaten koelvraaggedomineerde case

Voor de koelvraaggedomineerde case werd gebruik gemaakt van de belasting uit Tabel 4.3, hier hernomen als Tabel 10.5. Hierbij is de totale warmtevraag op jaarbasis $200kWh$ en de koelvraag $240kWh$. Dit is ook grafisch weergegeven in Figuur 10.1. Op basis van deze belasting wordt in Sectie 10.2.1 en Sectie 10.2.2 bekeken wat de optimale combinatie van technologieën is.

⁴Omdat regeneratie door een droge koeler 's nachts gebeurt.

10.2. Resultaten koelvraaggedomineerde case

Maand	Gemiddelde min. temp. [°C]	Gemiddelde temp. [°C]	Gemiddelde max. temp. [°C]	Zonneflux [kWh/m ²]
Januari	0.7	3.3	5.7	0.3637
Februari	0.6	3.7	6.6	0.4791
Maart	3.1	6.8	10.4	0.6222
April	5.3	9.8	14.2	0.6970
Mei	9.2	13.6	18.1	0.7506
Juni	11.9	16.2	20.6	0.7911
Juli	14.0	18.4	23.0	0.7534
Augustus	13.6	18.0	22.6	0.6838
September	10.9	14.9	19.0	0.6088
Oktober	7.8	11.1	14.7	0.4883
November	4.1	6.8	9.5	0.3938
December	1.6	3.9	6.1	0.3501

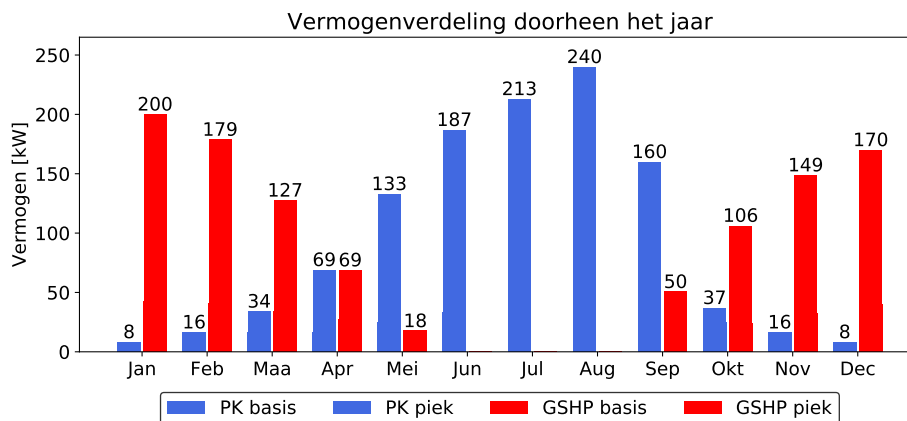
Tabel 10.3: meteorologische data voor België [45].

Nummer	Airco	Collector	Droge koeler	Gasketel	GSHP	LW WP	Passief koelen
1		✓				✓	✓
2		✓	✓	✓	✓		✓
3		✓	✓	✓	✓	✓	✓
4	✓	✓			✓		✓
5		✓		✓	✓		✓
6	✓	✓	✓		✓	✓	✓
7		✓	✓		✓		✓
8	✓	✓		✓	✓	✓	✓
9	✓	✓	✓	✓	✓		✓
10	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
11		✓			✓	✓	✓
12	✓	✓		✓	✓		✓
13		✓		✓	✓	✓	✓
14	✓	✓			✓	✓	✓
15	✓	✓	✓		✓		✓
16		✓	✓		✓	✓	✓

Tabel 10.4: Alle combinaties van technologieën.

Maand	Piekvermogen [kW]		Basisbelasting [%]	
	Koeling	Verwarming	Koeling	Verwarming
Januari	0	200	2,5	15,5
Februari	0	179	5,0	14,8
Maart	34	127	5,0	12,5
April	69	69	5,0	9,9
Mei	133	0	7,5	6,4
Juni	187	0	10,0	0,0
Juli	213	0	20,0	0,0
Augustus	240	0	20,0	0,0
September	160	50	10,0	6,1
Oktober	37	106	7,5	8,7
November	0	149	5,0	11,7
December	0	170	2,5	14,4

Tabel 10.5: Gebruikte belasting voor de koelvraaggedomineerde casestudie voor het boorveld.



Figuur 10.1: Grafische representatie van de warmte- en koelvraag (koelvraaggedomineerde case).
(PK is passief koelen en GHSP is de grondwarmtepomp)

10.2.1 Zonder regeneratie

Zoals in Sectie 9.1.1 staat aangegeven, wordt voor elke permutatie van technologieën de totale kostprijs berekend over een studieperiode van 20 jaar. Het resultaat van deze analyse is te zien in Figuur 10.2(a), waarin de verschillende combinaties verwijzen naar Tabel 10.4. Er vallen enkele zaken meteen op

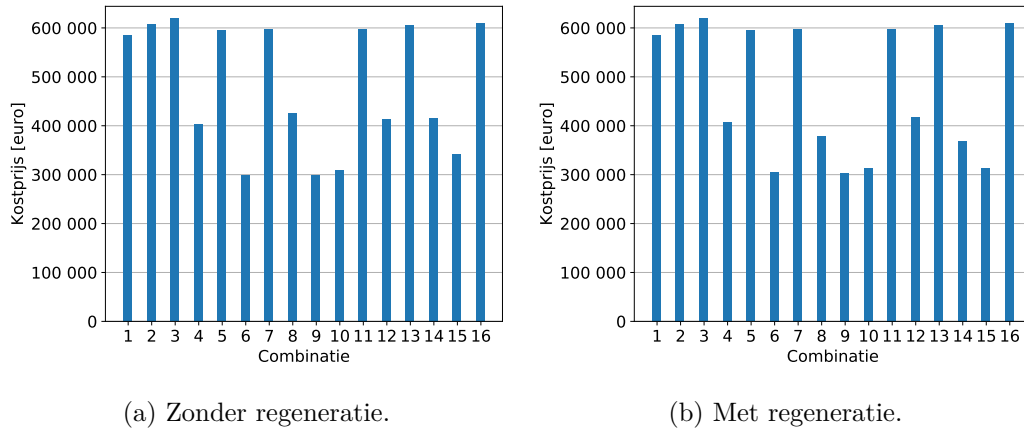
- Allereerst zijn de combinaties 6, 9 en 10 ongeveer gelijk. Het verschil tussen deze combinaties onderling is dat combinatie 10 zowel een gasketel als een lucht-waterwarmtepomp heeft en combinatie 9 en 6 respectievelijk enkel een lucht-waterwarmtepomp en een gasketel heeft. Hiervan is combinatie 6 net iets goedkoper omdat de werkingskost van een lucht-waterwarmtepomp net iets lager is dan die van een gasketel. In combinatie 10 is de gasketel dan ook niet gebruikt.
- Veel technologiecombinaties hangen rond de kostprijs van 600 000 euro. Dit zijn de combinaties die geen airco ter beschikking hebben. Omdat dit een koelvraaggedomineerd geval is, is het reduceren van de piekvraag naar koeling cruciaal. Sommigen hebben echter nog wel een droge koeler, maar aangezien deze in de zomermaanden (zie Tabel 10.3) omwille van de te hoge temperatuur niet kan werken, is deze niet in staat de piekvermogens op die momenten op te vangen⁵.
- De combinaties 4, 8, 12 en 14 hangen wat tussen beide extrema in. Dit zijn de combinaties die geen droge koeler ter beschikking hebben en dus een grotere werkingskost aan airco vragen in de maanden waarin de droge koeler zou kunnen werken. Het verschil in werkingskost tussen een airco en een droge koeler verklaart dan ook het verschil tussen deze combinaties en de goedkopere.

De optimale combinatie aan technologieën is te zien in Figuur 10.3. Hierin valt op dat quasi alle piekkoeling op de externe airco is gezet en dat de basisbelasting aan koeling in de koudere maanden door de droge koeler wordt opgevangen. Er is evenzeer een kleine oppervlakte aan zonnecollector geïnstalleerd die een deel van de basisbelasting verwarming op zich neemt.

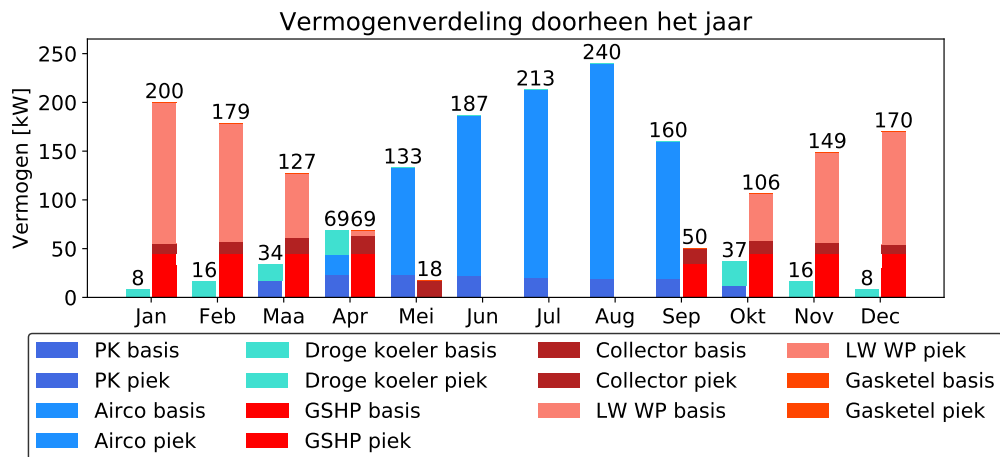
Op Figuur 10.5(a) zijn heel duidelijk de sporen van het algoritme zichtbaar. Het veld is volledig gebalanceerd (dit omdat de droge koeler goedkoop veel basisbelasting kan overnemen) en de pieken zijn afgevlakt. Het veld is gelimiteerd in meerdere maanden langs beide zijden. Dit maakt ook meteen duidelijk waarom het veld niet meer verder gereduceerd kan worden: het is nu in vier maanden door basisbelasting gelimiteerd. Een reductie in grootte zou een grote werkingskost vereisen van de externe technologieën; iets wat niet zou lonen.

⁵Moest een koeltoren mee in rekening zijn gebracht, had deze tijdens de piekmaanden wel kunnen werken.

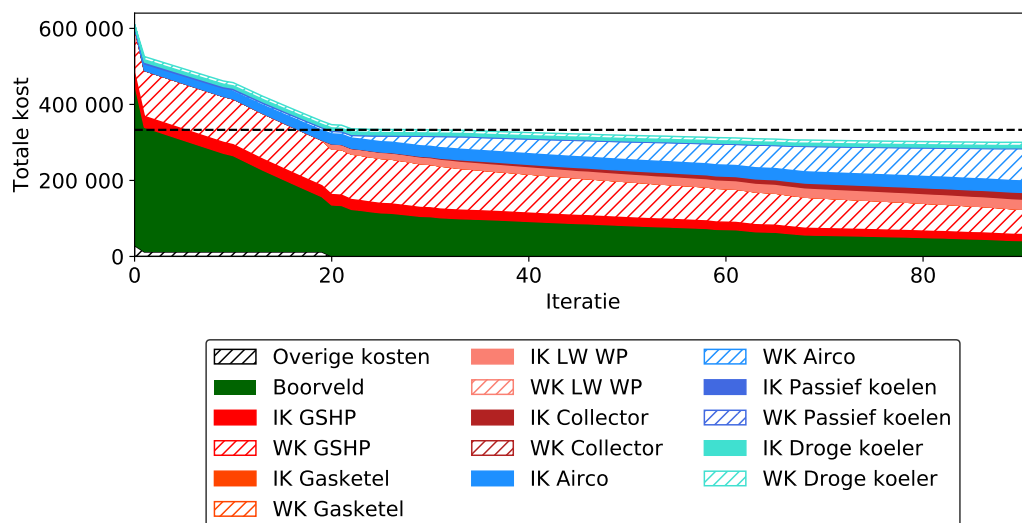
10.2. Resultaten koelvraaggedomineerde case



Figuur 10.2: De totale kostprijs voor elke combinatie van technologieën (koelvraaggedomineerde case).



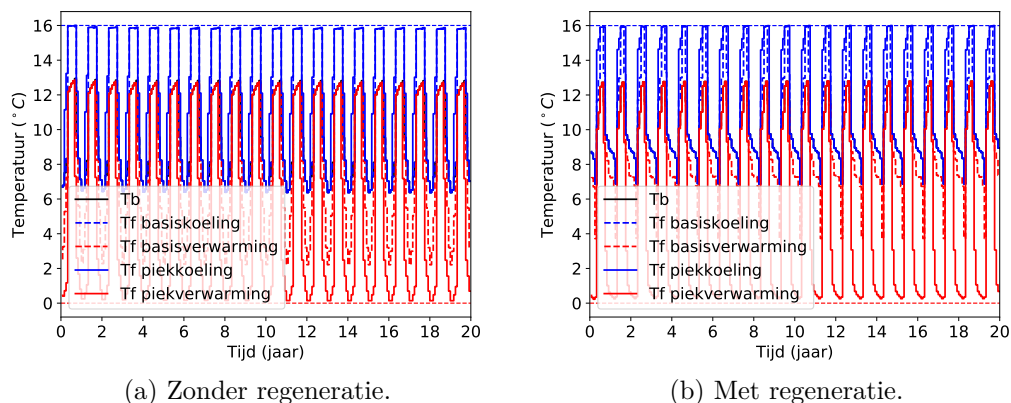
Figuur 10.3: De meest economische verdeling van de vermogens bij een koelvraaggedomineerd veld zonder regeneratie.



Figuur 10.4: Gestapelde kostcurve van het ideaal geval in een koelvraaggedomineerd geval.

Figuur 10.4 geeft weer hoe de totale kost evolueerde doorheen de verschillende iteraties. De overige kosten staan hier voor de technologieën die aanwezig zijn, maar niet gebruikt worden. Het gaat dus om de offsetkosten van deze technologieën. De weergegeven stippellijn is de referentiekost voor een hybride systeem zonder boorveld. Enkele cruciale punten staan hieronder vermeld.

- In de eerste iteratie daalt het veld meteen van 121m diepte naar 85,4m. Dit komt omdat de piek door de airco wordt afgevlakt en een droge koeler is geïnstalleerd om het veld te balanceren. Het veld is nu eveneens in twee maanden gelimiteerd. Volgende iteraties blijven het veld reduceren op piek.
- Vanaf de vierde iteratie is een derde maand limiterend geworden. Het veld is nu 76m diep. Verdere daling gebeurt door piekvermindering.
- Vanaf iteratie 8 is het veld door 4 maanden gelimiteerd. Het veld is nu 67m diep. Vanaf nu blijft een verdere daling in veldgrootte hoofdzakelijk te danken aan een reductie in piekvermogen.
- Vanaf iteratie 11 is het veld in 5 maanden gelimiteerd. Het veld is nu 50m diep. Verdere reductie gebeurt nog steeds hoofdzakelijk via piekreductie.
- Vanaf iteratie 18 is het veld ook langs de verwarmingszijde gelimiteerd en zitten we in een gemengde boorveldbelasting. Het veld is nog maar 35.5m diep en verdere reductie gebeurt met een lucht-waterwarmtepomp en verder met piekvermogen airco.



Figuur 10.5: Temperatuursverloop in het boorveld (koelvraaggedomineerd).

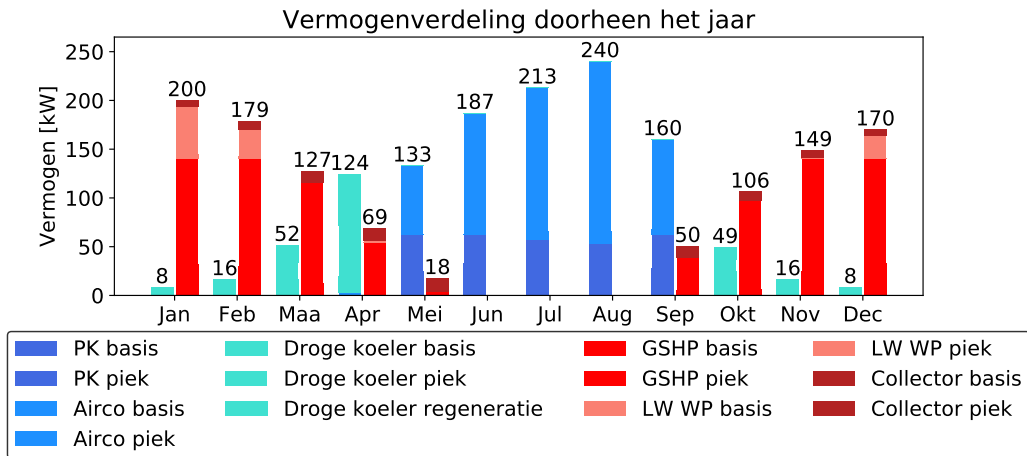
- Vanaf iteratie 24 begint een collector voordelig te worden die, naast de piekreductie door de lucht-waterwarmtepomp, ook wat basisbelasting wegneemt. Dit compenseert een daling van de basisbelasting koeling om het veld gebalanceerd te houden. Dit alles zet zich verder tot de laatste iteratie.
- Uiteindelijk wordt een veld van 10.5m diepte bekomen, wat voor een 10x12 boorveld 1260m leiding impliceert. Het is in dit uiteindelijke geval echter wel beter om in de praktijk minder, maar diepere boorputten te voorzien. Op deze diepte is namelijk nog temperatuursinvloed van de seizoenen mogelijk [1]. De verandering van configuratie beïnvloedt echter wel de g-functies (cf. infra).

Deze analyse bevestigt de vermoedens van de casestudie. Piekvermogensdaling blijft het voornaamste mechanisme waarmee het veld kan gereduceerd worden. Omdat de werkingskost van een droge koeler zo laag is, kan een balancering van het veld ook economisch gebeuren, hetgeen niet het geval was in de casestudie.

Indien naar de kosten zelf wordt gekeken, valt op dat het verschil tussen een hybride systeem met of zonder boorveld niet zo uitgesproken aanwezig is. Dit is te wijten aan een grotere set van technologieën die in rekening zijn gebracht. In het bijzonder hebben de droge koeler en de collector voor een daling gezorgd van de werkingskost, iets wat zich meer manifesteert in de referentiecasse. Hierdoor is het verschil tussen beide niet zo groot. Wel is de kost in absolute waarden kleiner dan deze uit de referentiecasse.

10.2.2 Met regeneratie

Voor regeneratie wordt dezelfde oefening gedaan als hierboven. Het resultaat van de kosten voor de verschillende technologieën is te vinden in Figuur 10.2(b). Het eerste dat opvalt, is dat deze kosten haast identiek zijn aan de situatie zonder regeneratie. De analyse die hierboven over de verschillende balkjes is gemaakt, is dus ook hier



Figuur 10.6: Meest economische verdeling van de vermogens bij een koelvraaggedomineerd veld met regeneratie.

van toepassing. De ideale combinatie van technologieën is nog steeds dezelfde en is te zien in Figuur 10.6.

In Figuur 10.6 zijn grote verschillen merkbaar ten opzichte van Figuur 10.3 voor de situatie zonder inbegrip van regeneratie. Zo valt het op dat, omdat er regeneratie is, er minder basisbelasting is verschoven naar de airco. Omdat vermindering van basisbelasting koeling hetzelfde effect heeft op de ondergrond als regeneratie door een koeltechnologie, is het duidelijk dat dit effect nu is opgenomen door de droge koeler. Dit gebeurt hoofdzakelijk in april, omdat deze maand het dichtste ligt bij de limiterende maanden en aldus het grootste effect heeft.

Het valt ook op dat er veel minder piekvermogen is gereduceerd aan de verwarmingszijde. Dit is te begrijpen aan de hand van het temperatuursverloop in de ondergrond, te zien in Figuur 10.5(b) dat er grilliger uitziet dan de versie zonder regeneratie. Het valt op dat het veld wederom gebalanceerd is en (benaderend)⁶ gelimiteerd is aan beide zijden. Echter zijn er hier minder limiterende maanden dan voordien en valt het op dat de limiterende maand bij verwarming samenvalt met de maand waarin er veel geregenereerd werd. Om hier verder te reduceren, is een daling in de basisbelasting nodig, omdat aan de koelingszijde nu een basislimitatie is opgetreden. In tegenstelling tot voorheen kan dit niet meer gecompenseerd worden door te regenereren, omdat dan de minimale temperatuur zou worden onderschreden. Deze basisbelastingreductie in combinatie met een extra investering voor een lucht-waterwarmtepomp, weegt niet op tegen de besparing in boorveldgrootte.

⁶In het algoritme is om praktische redenen op meerdere plaatsen met temperatuursthresholds gewerkt. Dit is de reden waarom op Figuur 10.5 geen zichtbare limitatie aan de minimumgrens te zien is in het laatste jaar.

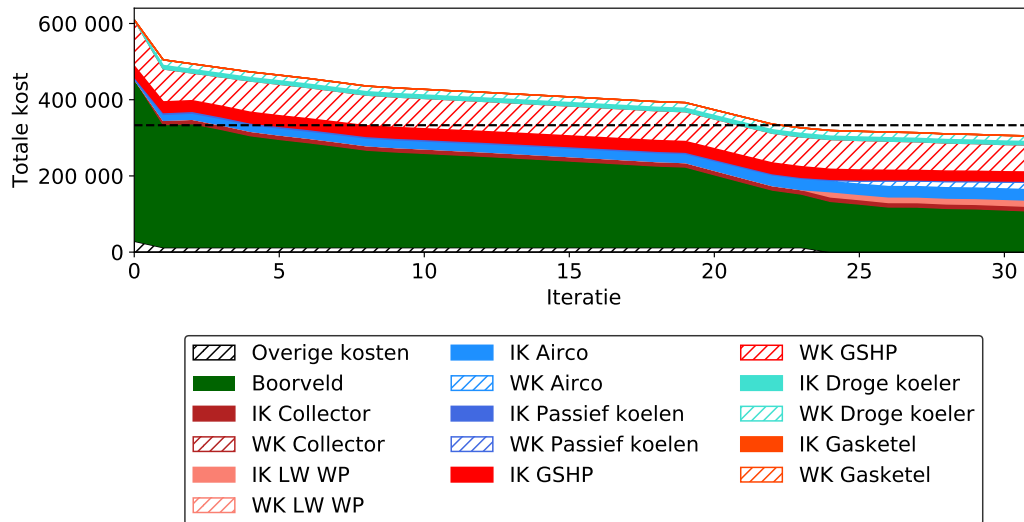
Uiteindelijk wordt dus voor zowel het geval met als zonder regeneratie hetzelfde eindresultaat in kostprijs gevonden. De manier waarop is echter, zoals hierboven al bleek, sterk verschillend. Een nog duidelijker verschil is te zien in Figuur 10.7 wanneer deze vergeleken wordt met Figuur 10.4 die de situatie zonder regeneratie beschrijft. Hieronder wordt besproken hoe het algoritme tot dit resultaat kwam.

- In de eerste iteratie gaat het veld, net zoals in de situatie zonder regeneratie, gereduceerd worden door het piekvermogen van het passief koelen te laten zakken. Daarnaast gaat een droge koeler gebruikt worden om de onbalans te reduceren. Echter, omdat hier ook geregenereerd kan worden, gaat er meer basisbelasting door de droge koeler worden geïnjecteerd in de ondergrond dan strikt noodzakelijk is voor een balancering. Dit gebeurt omdat langs de verwarmingszijde extra basisbelasting zou kunnen worden gegeven aan een zonnecollector. De extra regeneratie compenseert dit effect en daar de werkingskost van een zonnecollector lager is dan die van een GSHP, heeft dit een gunstig effect op de kostprijs. De boorvelddiepte bedraagt nu 84.7m.
- Voor de rest daalt het veld door de piekvermogens te reduceren totdat in de 22^{ste} iteratie het veld ook langs de warme zijde wordt gelimiteerd. Het veld is nu 36.6m diep en gaat delen van het piekvermogen van de verwarming naar de lucht-waterwarmtepomp sturen om verder te reduceren. Dit stopt wanneer het veld uiteindelijk 22.6m diep is.

De reductie stopt hier sneller dan in het geval zonder regeneratie, maar wel met eenzelfde orde qua totale kost. Er is echter een significant verschil in de herkomst van de kosten. In tegenstelling tot het geval zonder regeneratie, is er hier een veel groter aandeel aan investeringskost dan aan werkingskost. Dit zou minder gunstig kunnen zijn vanuit een economisch standpunt, maar vanuit een duurzaamheidsstandpunt is dit wel positief te noemen. Wederom wordt het belang van piekvermogenreductie duidelijk en worden de vermoedens uit de casestudie enigszins bevestigd.

Wel is het zo dat de besparing, vooropgesteld in de casestudies, hier ook niet zo aanwezig is. Wederom is dit te wijten aan een grotere set aan technologieën (en hoofdzakelijk de droge koeler en collector) die ook in het referentiegeval de werkingskosten significant doen dalen. De totale kostprijs is dan ook lager dan deze voorspeld in de casestudies.

Merk op dat de vraag kan gesteld worden waarom het algoritme hier stopt en of het niet mogelijk is verder te reduceren. Het blijkt immers dat zonder regeneratie het veld, met dezelfde kost, kleiner kan zijn. Op dit aspect wordt kort ingegaan in Hoofdstuk 11.



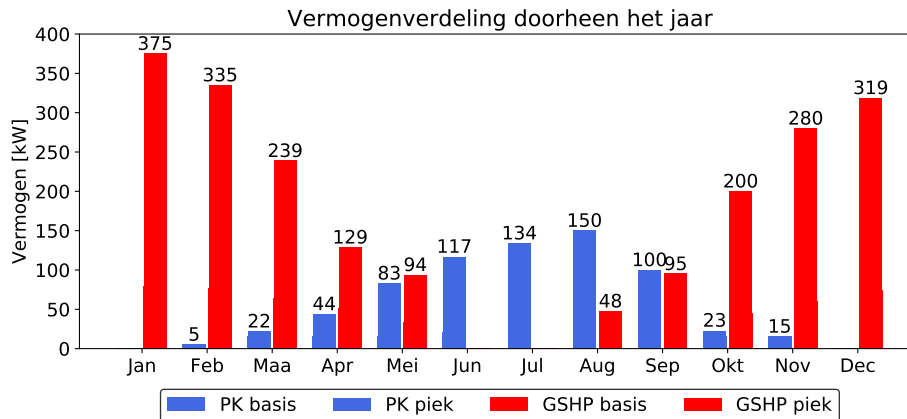
Figuur 10.7: Gestapelde kostcurve van het ideaal geval bij regeneratie in een koel-
vraaggedomineerde case.

Maand	Piekvermogen [kW]		Basisbelasting [%]	
	Koeling	Verwarming	Koeling	Verwarming
Januari	0	375	0	15,5
Februari	0	335	2,5	14,8
Maart	22	239	7,5	12,5
April	44	129	7,5	9,9
Mei	83	94	7,5	6,4
Juni	117	0	10,0	0,0
Juli	134	0	20,0	0,0
Augustus	150	48	20,0	0,0
September	100	95	10,0	6,1
Oktober	23	200	7,5	8,7
November	0	280	7,5	11,7
December	0	319	0,0	14,4

Tabel 10.6: Gebruikte belasting voor de warmtevraaggedomineerde casestudie voor het boorveld.

10.3 Resultaten warmtevraaggedomineerde case

In deze sectie worden de resultaten besproken voor de warmtevraaggedomineerde case. De vereiste warmte- en koelvraag staan opgelijst in Tabel 4.4, maar is hier als Tabel 10.6 hernomen. Grafisch is de belasting weergegeven in Figuur 10.8. Hierbij is de totale warmtevraag op jaarbasis $375kWh$ en de koelvraag $150kWh$.



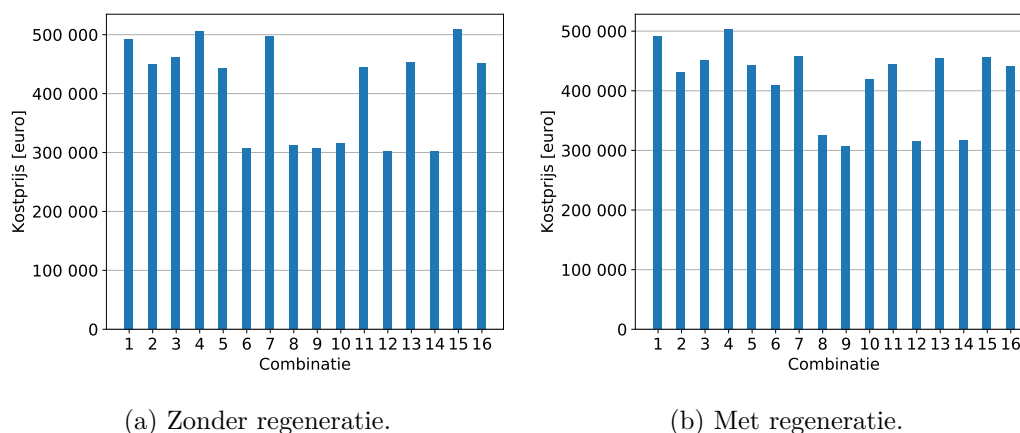
Figuur 10.8: Grafische representatie van de koel- en warmtevraag (warmtevraaggedomineerde case).
(PK is passief koelen en GHSP is de grondwarmtepomp)

10.3.1 Zonder regeneratie

Net zoals in de koelvraaggedomineerde case, werd deze situatie berekend voor alle mogelijke sets aan technologieën en staat het resultaat grafisch weergegeven in Figuur 10.9(a) voor het geval zonder regeneratie. In tegenstelling tot de koelvraaggedomineerde case, zijn er hier slechts twee duidelijke groepen te herkennen. Wederom kunnen hieruit bepaalde conclusies getrokken worden.

- De combinaties aan technologieën die een hoge kost behouden, zijn de sets aan technologieën die o.a. geen airco bevatten. Zoals ook bleek in de casestudie is tijdens de reductie het veld relatief snel door een koelpiek gelimiteerd. Indien de set aan technologieën dan geen airco bezit, is het niet mogelijk een verdere reductie door te voeren. Voor de andere groep aan combinaties geldt de redenering andersom.
- Combinatie 12 en 14 zijn haast aan elkaar gelijk. Het verschil tussen beide is dat combinatie 12 een gasketel heeft en combinatie 14 een lucht-waterwarmtepomp. Door de COP van de warmtepomp is in de maanden waarin de reductie wordt doorgevoerd de werkingskost nauwelijks verschillend van de werkingskost van de gasketel⁷. Verder worden beide technologieën haast enkel voor piekreducties gebruikt, wat maakt dat door het kleine verschil in werkingskost en de grotere initiële kost van de warmtepomp, het voordeel net naar de combinatie met gasketel helt. Als de CO₂-kost in rekening zou zijn gebracht, zou de gasketel er evenzeer slechter uit zijn gekomen (zie Hoofdstuk 11).

⁷De COP in de wintermaanden is ongeveer 3.55 (Vergelijking (10.1) en Tabel 10.3). Met een elektriciteitskost van 0.1466€ komt dit neer op 0.0413€ hetgeen nauw aansluit bij de 0.0464€ voor de gasketel.



(a) Zonder regeneratie.

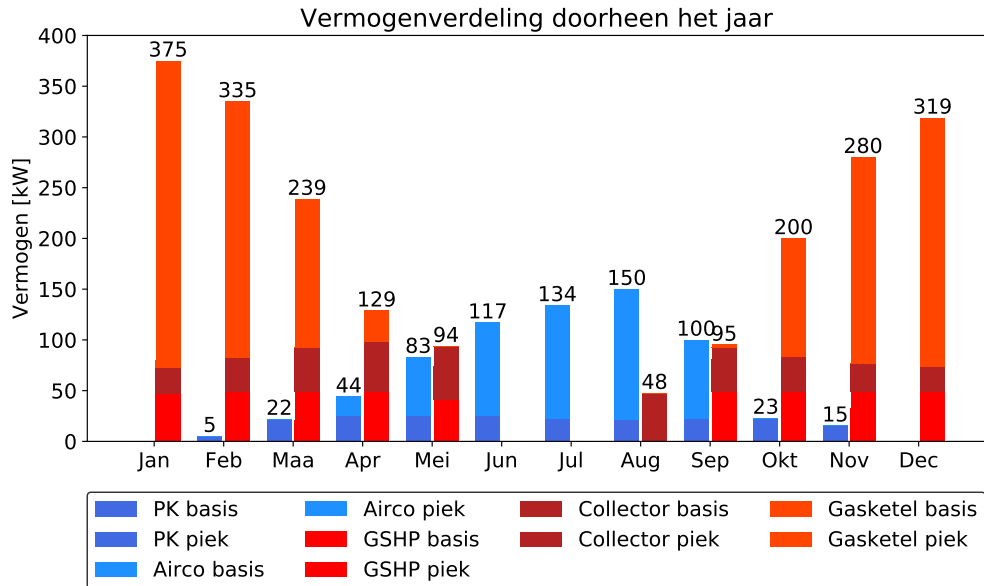
(b) Met regeneratie.

Figuur 10.9: De totale kostprijs voor elke combinatie van technologieën (warmtevraaggedomineerd).

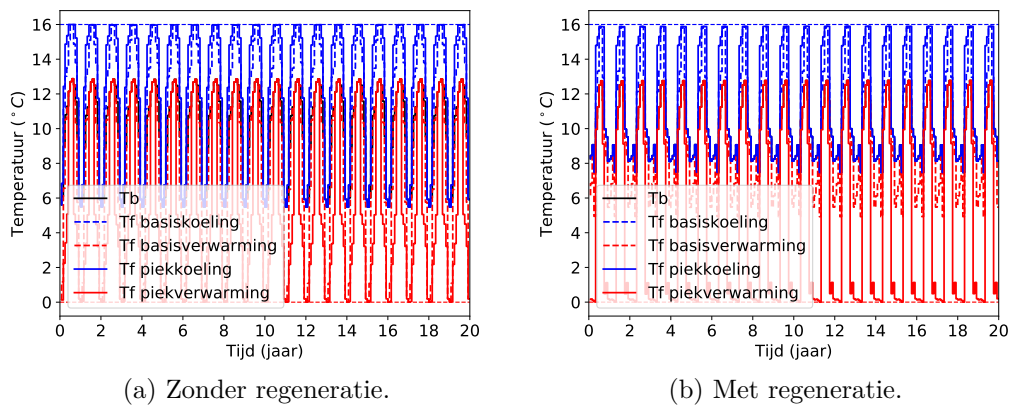
De ideale combinatie van technologieën en de precieze verdeling van de vermogens is terug te vinden in Figuur 10.10. Hierin is goed zichtbaar dat er amper basisvermogen naar de gasketel gaat en dat de grote pieken van de verwarming en koeling naar externe technologieën zijn gebracht. Dit is ook te zien in het temperatuursverloop van de bodem, weergegeven in Figuur 10.11(a).

Het valt op dat het veld, net zoals in de koelvraaggedomineerde case, volledig gebalanceerd is. Dit is mogelijk dankzij de zonnecollectoren. Evenzeer zijn alle pieken weggewerkt in de limiterende maanden, zowel langs de koel- als de verwarmingszijde. Een verdere veldreductie zou impliceren dat er basisbelasting naar deze externe technologieën moet gaan wat voor een grotere kost zou zorgen. De iteratie stopt dus met dit veld. Het kostverloop van de iteraties kan afgelezen worden in Figuur 10.12 en wordt hieronder verder toegelicht.

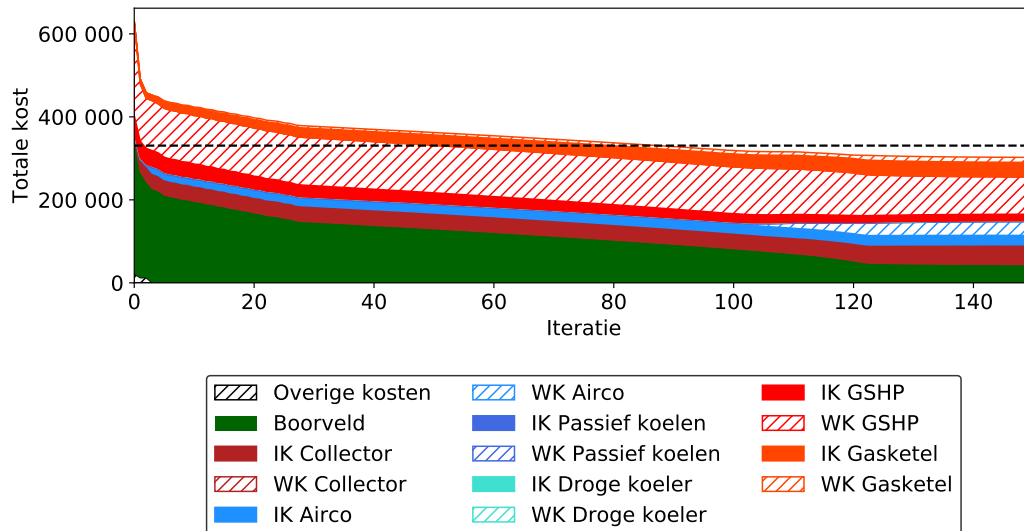
- In de eerste iteratie wordt door de zonnecollector de onbalans volledig weggewerkt en wordt de piek van de verwarming gereduceerd. Dit is gelijkaardig aan wat er met het koelvraaggedomineerde geval gebeurde. Het veld is na de eerste iteratie meteen in een gemengde limitatie terechtgekomen en is gedaald van 93.8m naar 66.6m diep.
- Vanaf de tweede iteratie gaat het veld zowel aan verwarmingszijde als aan koelzijde gereduceerd worden op piek. Dit zet zich gedurende vele iteraties verder. Na de tweede iteratie is het veld 59.2m diep.
- Vanaf de vierde iteratie is het veld aan beide zijden door twee maanden piekgelimiteerd. Verdere reductie gebeurt nog steeds door het piekvermogen te reduceren. Het veld is nu 55.2m diep.
- Vanaf iteratie 103 is het veld mede gelimiteerd op de basisbelasting koeling. Vanaf nu wordt er dus ook basisbelasting aan de externe airco gegeven. Dit



Figuur 10.10: De meest economische verdeling van de vermogens bij een warmtevraagdomeineerd veld zonder regeneratie.



Figuur 10.11: Temperatuursverloop in het boorveld (warmtevraagdomeineerd).



Figuur 10.12: Gestapelde kostcurve van het ideaal geval in een warmtevraaggedomineerd geval.

zet zich voort tot de laatste iteratie. Het veld is nu 20.6m diep en eindigt tenslotte op een diepte van 11.5m. Omdat het veld zo ondiep is, is het opnieuw aan te raden om een andere configuratie met minder boorgaten, maar wel dieper, te gebruiken om de seizoensinvloed te ontlopen. Dit echter verandert de g-functies (die afhankelijk zijn van de boorveldconfiguratie) en vereist enige voorzichtigheid.

De vermoedens van de cases zijn hier wederom bevestigd. Daar waar het preliminaire onderzoek stopte bij de vaststelling dat het veld aan de koelzijde gelimiteerd werd, is hier verder gegaan. Het is wederom goedkoper om een hybride systeem met boorveld te implementeren, al is het verschil in kostprijs relatief klein.

In praktijk echter ligt de situatie mogelijks anders. In deze berekeningen is een zonnecollector meegenomen die alle aanwezige zonneflux omzet in energie. In praktijk echter zijn 'slechts' efficiënties tot 80% haalbaar [47]. Omdat de zonneflux in een lineaire trend lijkt te stijgen naar de toekomst toe en in deze berekeningen niet van de goedkoopste panelen is uitgegaan, lijken deze resultaten toch enigszins representatief naar de toekomst toe [48].

10.3.2 Met regeneratie

In de warmtevraaggedomineerde case wordt er niet meteen verwacht dat er aan regeneratie gedaan gaat worden. Het is namelijk zo dat de enige technologie die hiervoor in aanmerking zou kunnen komen, de zonnecollectoren zijn. Echter, hetzelfde effect op de bodem zou perfect kunnen bereikt worden met gewoon de basisbelasting

te reduceren, omdat zonnecollectoren (in tegenstelling tot de droge koeler in Sectie 10.2.2) wel een heel jaar door kunnen werken. Weer is er voor alle combinaties gekeken naar de meest kostenefficiënte oplossing. Het resultaat hiervan is te zien in Figuur 10.9(b). Enkele zaken vallen hier op.

- In tegenstelling tot Figuur 10.9(a) zijn de combinaties 6 en 10 veel duurder geworden. Dit zijn de combinaties die ook over een droge koeler beschikken. De situatie die hier optreedt, is dus zeer gelijkaardig aan die van de koelvraaggedomineerde case met inbegrip van regeneratie. Er is een deel regeneratie van de collector die gebruikt wordt om extra basisbelasting koeling te kunnen compenseren⁸. Het algoritme is niet volledig in staat om met die rechtstreekse substitutie om te gaan en blijft in een lokaal minimum steken (zie ook Hoofdstuk 11).
- In tegenstelling tot de studie zonder regeneratie, is er hier wel een groter verschil tussen de combinaties die een droge koeler hebben en deze zonder. In dit geval is combinatie 9 (met droge koeler) de meest voordelige. De vermogensverdeling voor dit geval is weergegeven in Figuur 10.13.

Figuur 10.13 vertoont grote gelijkenissen met Figuur 10.10 van Sectie 10.3.1. Een klein verschil tussen beide is een beetje regeneratie door de droge koeler in de maand april. Dit is aanwezig om een verdere basisreductie van de verwarming te compenseren zoals dit bij de koelvraaggedomineerde case evenzeer het geval was. In het temperatuursverloop in Figuur 10.11(b) is dit ook zichtbaar. Het valt op dat net zoals in de situatie zonder regeneratie het veld stopt met reduceren op het moment dat een basisreductie van de koelvraag aan de orde is.

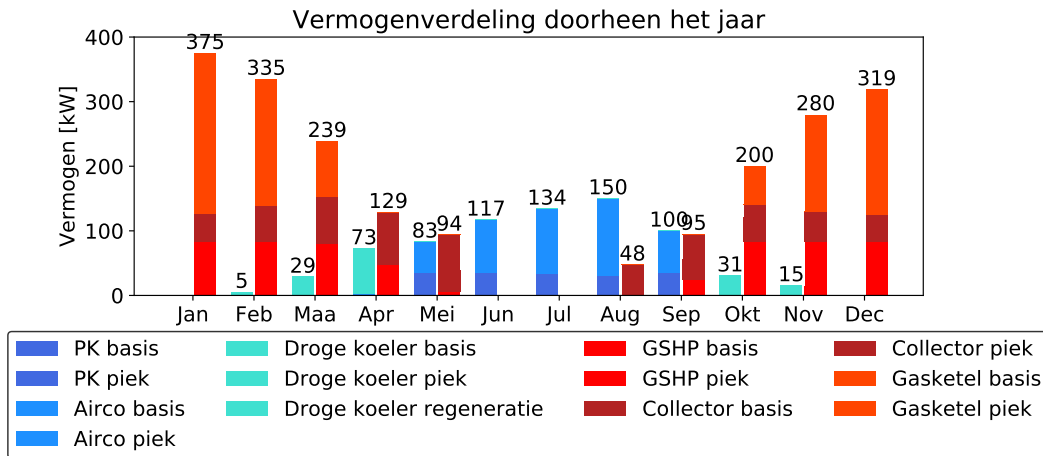
De precieze reductiestappen en technologiekeuzes zijn weergegeven in Figuur 10.14.

De evolutie van de technologieën kan relatief kort besproken worden.

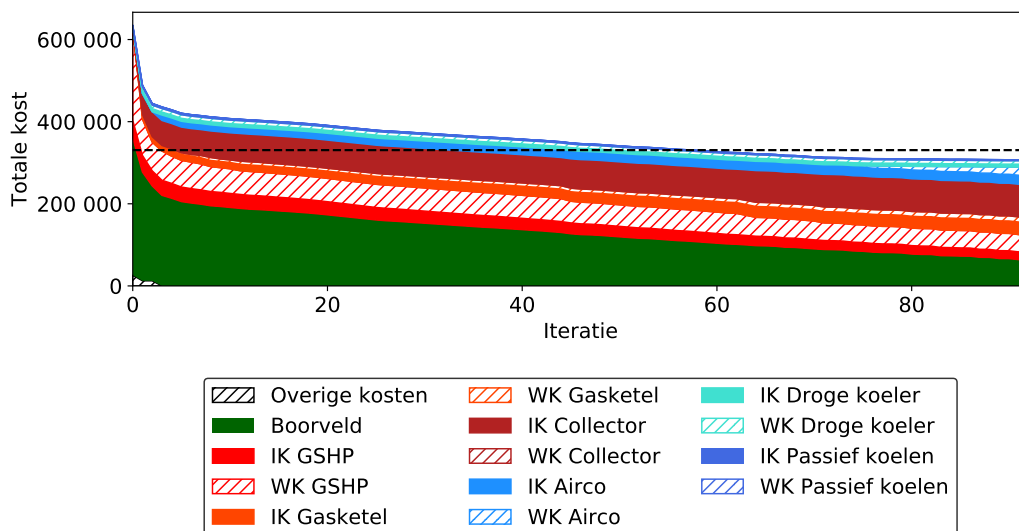
- Vanaf de eerste iteratie is het veld wederom gebalanceerd en is er zelfs extra regeneratie van een droge koeler gekomen om een extra basisbelastingsreductie door te voeren aan de verwarmingszijde.
- Het veld wordt vervolgens hoofdzakelijk door reductie van piekvermogens gereduceerd en pas vanaf iteratie 78 wordt er basisbelasting aan de airco gegeven. Het veld wordt uiteindelijk 16.7m diep.

Een heel groot deel van de totale kost gaat naar de investering in zonnecollectoren. Zoals op het einde van Sectie 10.3.1 al werd besproken, is het niet volledig zeker in welke mate dit realistisch is, daar de efficiëntie van de zonnecollector overschat is, maar de zonneflux evenzeer onderschat werd. Dit is verder een relatief duurzame oplossing (door het boorveld en de zonnecollector (en mits de substitutie van de gasketel door een lucht-waterwarmtepomp)) die een lage werkingskost heeft. In de

⁸Regeneratie door een collector warmt de bodem op die, omdat er extra basisbelasting koeling naar externe installaties gaat, afkoelt. Beide effecten compenseren elkaar.



Figuur 10.13: De meest economische verdeling van de vermogens bij een warmtevraagdomeinde veld met regeneratie.



Figuur 10.14: Gestapelde kostcurve van het ideaal geval (met regeneratie) in een warmtevraagdomeinde geval.

economische beslissing gaat echter het gewicht van investeringskost en werkingskost moeten meegenomen worden (alsook een mogelijke CO₂-kost (zie ook Hoofdstuk 11)).

10.4 Actief koelen

In deze sectie wordt nog een korte excursie gemaakt naar enkele optimalisaties met actief koelen. Actief koelen heeft als grote voordeel dat de temperatuurgrens in de ondergrond van 16°C naar 25°C kan worden opgetrokken (zie Tabel 10.2) wat maakt dat, zeker in koelvraaggedomineerde gevallen, het veld significant kleiner kan zijn. Hiertegenover staat dan wel dat er een extra werkingskost ontstaat, omdat actief koelen ook gebruik maakt van een compressiekoelmachine (zie ook Sectie 2.1).

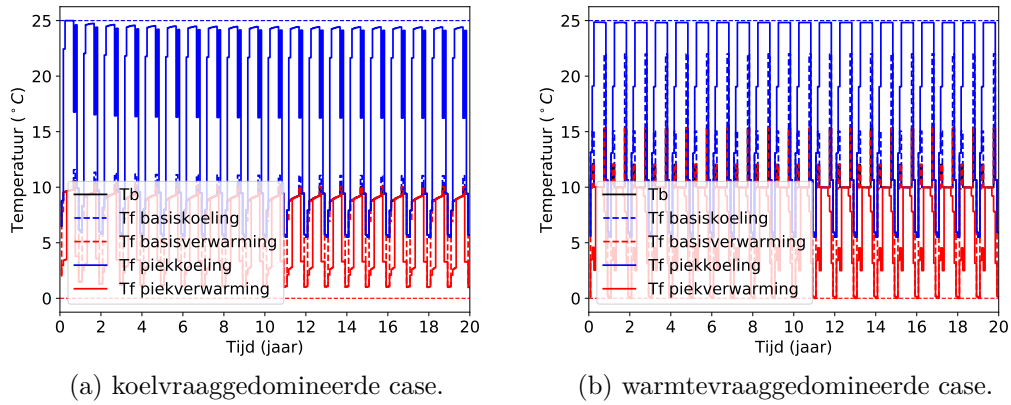
In deze thesis is louter gekeken naar de situatie met enkel actief koelen. Optimaal is het echter als passief koelen in sommige maanden wordt gebruikt in plaats van het actief koelen, als de temperatuur dit toelaat, om aldoende de werkingskost te drukken. Dit aspect is hier niet verder onderzocht, maar komt in Hoofdstuk 11 kort aan bod.

Zoals in de gevallen met passief koelen werd ook hier naar alle combinaties van technologieën gekeken en werd een kostprijs bepaald. Daar deze analyse zeer gelijkaardig is aan de bovenstaande, wordt hieronder verder enkel het meest optimale geval besproken. Omdat de conclusies die getrokken kunnen worden uit de verwarmings- en koelvraaggedomineerde case haast gelijk zijn, worden deze tezamen in wat volgt besproken. De optimale situatie voor het koelvraaggedomineerde geval is te vinden in Figuur 10.16 en voor het warmtevraaggedomineerde geval in Figuur 10.18.

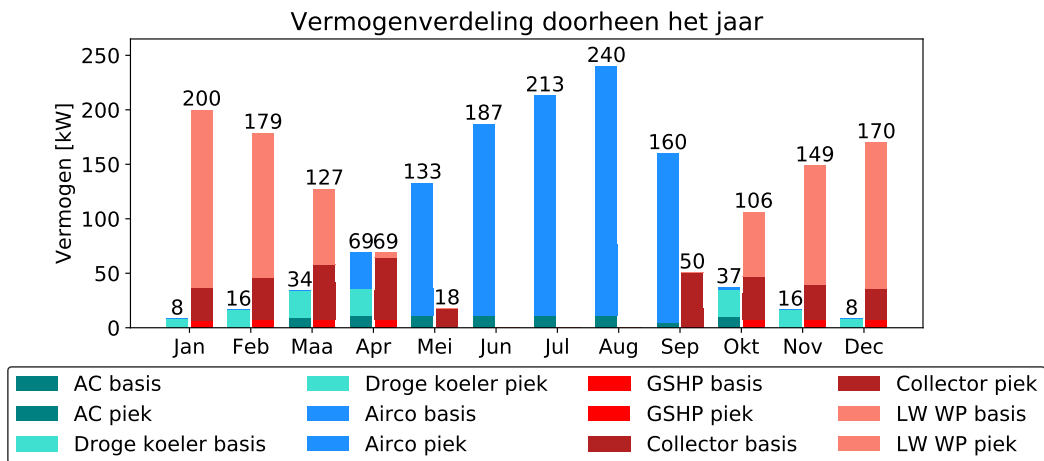
In beide figuren valt op dat de belasting op het boorveld tot een absoluut minimum is beperkt. Dit is omdat de werkingskost van het actief koelen gelijk is aan die van de airco en het dus voor de koeling niets uitmaakt of de basisbelasting van het veld komt dan wel vanuit een externe airco. Het veld is dan ook in beide gevallen gelimiteerd door piekkoeling en basisbelasting verwarming, zoals te zien is in Figuur 10.15(a).

Indien de gestapelde plot nader bekeken wordt, volgt dezelfde conclusie. Deze zijn voor het koelings- en warmtevraaggedomineerde geval respectievelijk Figuur 10.17 en Figuur 10.19. Er valt op dat het veld op het einde miniem van lengte is (een meter of 4 diep) en dat deze oplossing duidelijk convergeert naar een situatie zonder veld. De kostprijs uiteindelijk valt dan ook haast samen met die van de referentiecasse zonder boorveld.

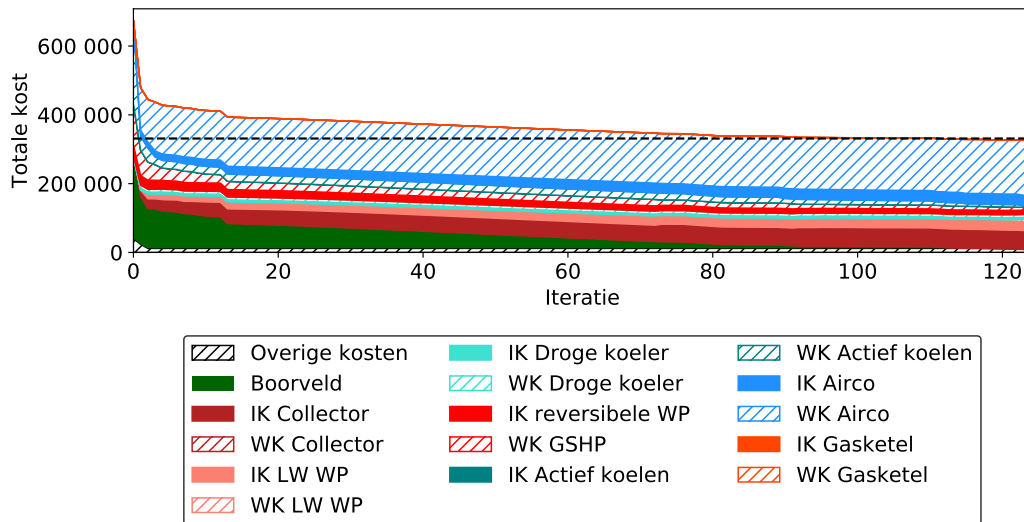
Uit deze korte analyse blijkt dan ook dat een boorveld dat enkel gebruik maakt van actief koelen voor de koelzijde van het probleem, niet voordelig is ten opzichte van een situatie zonder boorveld. Er rest hier enkel nog een open vraag: als een combinatie tussen actief en passief koelen wordt gebruikt, loont actief koelen dan wel? Hierop wordt kort ingegaan in Hoofdstuk 11.



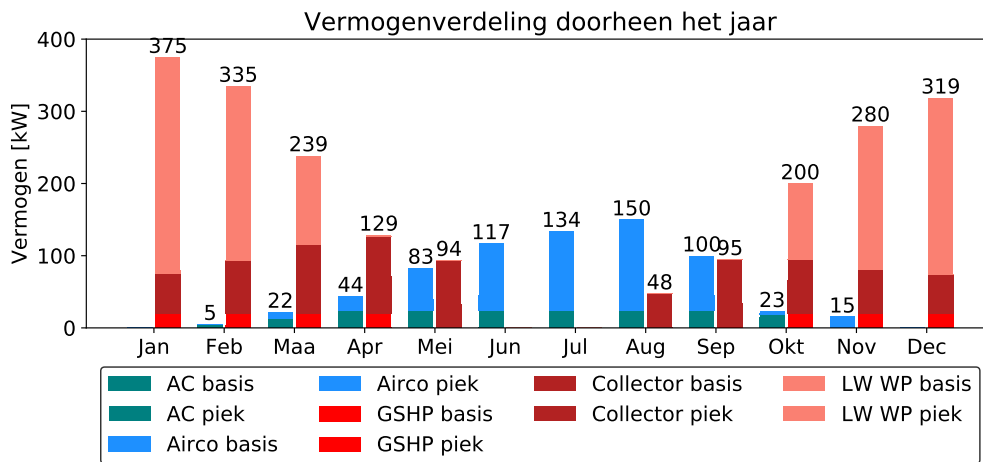
Figuur 10.15: Temperatuursverloop in het boorveld voor actief koelen.



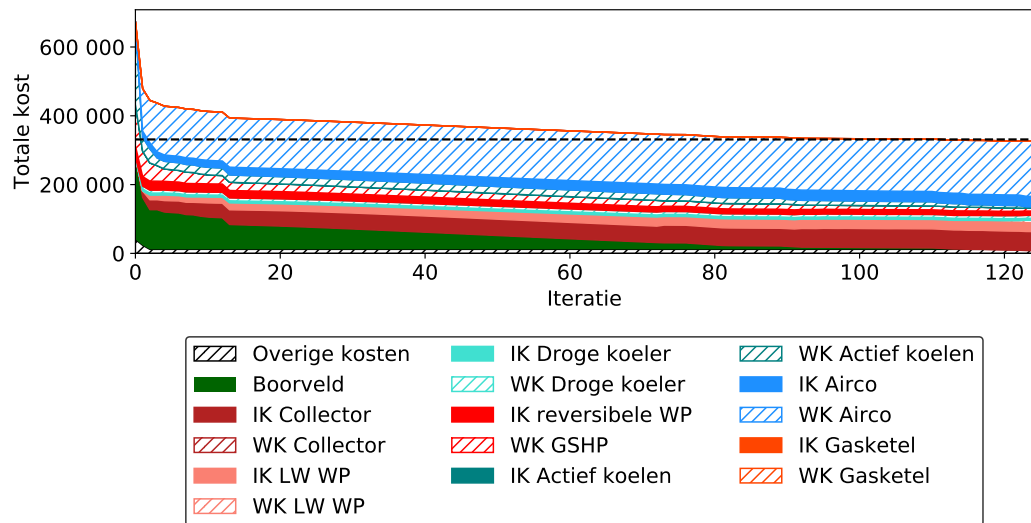
Figuur 10.16: De meest economische verdeling van de vermogens bij een koelvraaggedomineerd veld (actief koelen).



Figuur 10.17: Gestapelde kostcurve van het ideaal geval (koelvraaggedomineerd en actief koelen).



Figuur 10.18: De meest economische verdeling van de vermogens bij een warmtevraaggedomineerd veld (actief koelen).



Figuur 10.19: Gestapelde kostcurve van het ideaal geval (warmtevraaggedomineerd en actief koelen).

Hoofdstuk 11

Verder onderzoek

In dit hoofdstuk worden kort enkele zaken aangestipt die tijdens het werk aan deze thesis naar boven kwamen, maar die hier zelf niet verder zijn behandeld. Deze kunnen een aanknopingspunt vormen voor toekomstig en verder onderzoek.

Verdere reductie bij regeneratie

Zoals in Sectie 10.2.2 bleek, is het enigszins onverwacht dat de reductie zo snel stopt in het geval van regeneratie. Mogelijks heeft dit te maken met de manier waarop het lineaire programma omgaat met extra regeneratie en een extra basisreductie.

In de huidige formulering van het lineaire programma (zie Pagina 92) is het mogelijk dat een vereiste reductiemaatregel om het boorveld te doen dalen in grootte, kan worden bekomen door basisbelasting te transfereren naar externe technologieën, maar evenzeer door een eventuele regeneratie in die maand te laten zakken.

Wat mogelijks een probleem kan vormen in Figuur 10.7 in Sectie 10.2.2 is dat de regeneratie ook werd gebruikt om een extra basisreductie in verwarming te compenseren. Op het moment waarop de optimalisatie stopt, is een reductie in de maand waarin de regeneratie gebeurde, gewenst. Omdat echter initieel een deel van de regeneratie werd gebruikt om een extra basisbelasting van de verwarming te compenseren, zijn deze twee nu 'verbonden'. Het zou mogelijk moeten zijn om in dit geval de regeneratie te laten zakken en evenzeer, ter compensatie, weer een deel van de basisbelasting verwarming op de GSHP te zetten, om deze regeneratiedaling te compenseren. Dit laatste is echter in de huidige formulering niet mogelijk en zou de oorzaak kunnen zijn dat het programma niet verder kan optimaliseren. Het zou aldus een nuttige aanvulling zijn.

Validatie en robuustheid

Ofschoon het dimensioneringsalgoritme waarvan het optimalisatiealgoritme gebruik maakt, gevalideerd is door EED en Modelica, is het interessant om het gehele gedi-

mensioneerde systeem evenzeer te valideren. Componenten zijn namelijk nooit ideaal (zoals een zonnecollector) en in het systeem zitten altijd thermische inerties. Evenzeer is het weer niet altijd zoals voorspeld en is het dus niet altijd zeker in hoeverre de externe technologieën de vermogens kunnen leveren waarvoor ze gedimensioneerd zijn.

Omdat de totale warmte- en koelvraag toch geleverd moet worden, gaat het ontbreken van extra vermogen of energie opgevangen moeten worden door het boorveld. Hierdoor gaat mogelijks de temperatuur over de kritieke grenzen gaan en zou het kunnen dat het niet meer mogelijk is om (passief) te koelen. Er zou dus een robuustheidsanalyse moeten gedaan worden om te kijken hoe het systeem onder andere werkingscondities functioneert.

Bilineaire vergelijking

Zoals in Sectie 9.2.4 werd uitgerekend, is er een niet-lineariteit bij het in rekening brengen van de regeneratie. In deze thesis werd een vereenvoudiging gebruikt om dit probleem te omzeilen. Voor een meer nauwkeurig resultaat zouden andere solvers kunnen gebruikt worden die rechtstreeks met deze niet-lineariteit kunnen omgaan, zoals bijvoorbeeld Gurobi [41].

Extra (economische) parameters

Er is evenzeer ruimte voor een meer nauwkeurige formulering van de economische factoren. Zo speelde in deze thesis de tijds waarde van geld niet mee. Toch is deze van belang indien beslissingen over lange termijn moeten worden gemaakt en bij afwegingen tussen enerzijds een grotere investeringskost of anderzijds een grotere, gespreide, werkingskost. Zo ook zou een gewenste return on investment een parameter kunnen zijn die in verder onderzoek aan bod zou kunnen komen.

Daarnaast is het mogelijk om ook zaken als CO₂ mee in rekening te brengen. Dit zou kunnen door een CO₂-kost aan de verschillende technologieën toe te kennen, waardoor het boorveld er relatief beter uit zou komen. Op die manier kan de beschreven methode ook gebruikt worden voor een verduurzaming van het verwarmings- en koelsysteem.

Actief koelen

Ofschoon actief koelen in deze verhandeling kort werd besproken, zijn er nog vele aspecten die extra aandacht verdienen. In een ideaal geval wordt actief koelen gebruikt om de piekvraag van koeling voor het veld op te vangen en wordt de basisbelasting (goedkoop) via passief koelen uitgevoerd. Er moet daarom gekeken worden naar twee temperatuurgrenzen: een strikte voor de piekkoeling en een gewenste van 16°C om nog passief te kunnen koelen.

Een bijkomende moeilijkheid is dat met een reductie of een stijging van het aandeel basisbelasting dat het actief koelen opneemt, het veld eveneens regeneratie kan ondervinden. Indien bijvoorbeeld $1kWh$ van actief koelen naar passief koelen wordt gebracht, daalt de veldbelasting, omdat $1kWh$ actief koelen voor het veld neerkomt op effectief $0.66kWh$ koelbelasting en $0.34kWh$ te wijten is aan het elektrisch vermogen van de compressiekoelmachine dat ook in de ondergrond wordt geïnjecteerd. Er wordt dus bij deze shift van actief naar passief koelen $0.34kWh$ minder belasting op het veld gezet. Dit komt neer op een extra ingreep op de onbalans, hetgeen positief of negatief kan zijn (zie ook Sectie 8.3) en moet dus mee in rekening worden gebracht bij de beslissing welk aandeel van de belasting door het actief koelen gaat worden geleverd. In deze thesis is echter de ruggengraat gegeven die verder onderzoek in deze richting mogelijk maakt.

Twee deelproblemen combineren

Tenslotte is in deze verhandeling het optimalisatieprobleem behandeld als twee gekoppelde deelproblemen. Dit heeft als voordeel gehad dat er met veel inzicht kon gewerkt worden aan de boorveldzijde, maar heeft mogelijks wat inefficiënties met zich meegebracht. Om tot een algemene oplossing te komen, moet het algoritme veel combinaties bekijken voor de boorveldreductie en moeten er vele iteraties met verschillende sets aan technologieën worden uitgevoerd.

Er zou in de toekomst bekeken kunnen worden of het mogelijk is om op de een of andere manier de verschillende reductiemogelijkheden (piek-, basis- en piek-basisreductie) te lineariseren. Op deze manier wordt voorkomen dat het veld heel vaak moet worden geherdimensioneerd en gaat dit de snelheid ten goede komen¹. Of dit met de complexiteit van de dimensioneringsproblematiek echter mogelijk is, blijft na dit onderzoek een open vraag.

¹De huidige rekentijd om tot de getoonde grafieken te komen, bedroeg een kleine 2 uur.

Hoofdstuk 12

Conclusie

In deze thesis werd naar een combinatie van technologieën gezocht die samen met het boorveld een economisch optimaal hybride systeem vormen. Hiervoor werd vertrokken vanuit enkele casestudies die de richting aangaven waarin gedacht moest worden.

Er is geopteerd geweest om het gehele optimalisatieprobleem te splitsen in twee deelproblemen. Het eerste probleem betreft de mogelijke veldreducties. Hiervoor werden er vier reductieregels opgesteld die op een inzichtelijke wijze aangeven welke maatregelen er genomen kunnen worden om het veld te reduceren. Hiervoor werd onderscheid gemaakt tussen velden met een zuivere limitatie en velden met een gemengde limitatie die zowel piek-, basis- of piek-basisgelimiteerd kunnen zijn. Elk van deze situaties kreeg zijn eigen reductiealgoritme die samen een set aan reductieopties zouden opleveren.

In het tweede deel van het optimalisatieprobleem werden deze opties als input gebruikt voor een lineair programma dat bepaalt met welke externe technologieën deze reductie het best zou worden uitgevoerd. Door te itereren over verschillende combinaties aan technologieën, wordt uiteindelijk een optimale combinatie van technologieën en hun respectievelijke vermogens bekomen.

De resultaten van deze onderneming bevestigen de vermoedens van de casestudies, maar geven ook aanleiding tot verdere vragen. Allereerst zijn de hybride systemen die gebruik maken van het boorveld goedkoper dan de referentiesystemen, maar minder dan in de casestudies werd verwacht. Dit is hoofdzakelijk te wijten aan een bredere set van technologieën die in rekening werd gebracht.

Voor zowel de koel- alsook de warmtevraaggedomineerde gevallen is de reductie van piekvermogen het middel bij uitstek waarmee het veld in grootte wordt gereduceerd. In beide gevallen is door de droge koeler alsook de zonnecollectoren het veld ook meteen gebalanceerd geworden. Indien deze laatste twee technologieën niet aanwezig zijn, zou een veldbalancering een veel kostelijkere affaire zijn.

Bij de koelvraaggedomineerde case is de kostprijs zonder of met regeneratie haast gelijk, al verschilt de herkomst van de kosten. Zonder regeneratie is er een grote werkingskost en met regeneratie overheerst de investeringskost. Hetzelfde geldt ook voor het warmtevraaggedomineerde geval. De keuze tussen met of zonder regeneratie, moet dan op basis van extra economische factoren gebeuren. Het is echter ook mogelijk dat het resultaat van de regeneratie hier niet het meest optimale antwoord gaf, omdat het algoritme mogelijk niet uitgebreid genoeg is om hiermee om te gaan. Verder onderzoek moet dit uitwijzen.

Daarnaast werd kort gekeken naar systemen met louter actief koelen waaruit bleek dat dit geen voordelen biedt ten opzichte van hybride systemen zonder boorveld. Het is echter mogelijk dat systemen die zowel actief als passief koelen gebruiken economisch voordeliger zouden kunnen zijn. Dit is eveneens een piste voor verder onderzoek.

Verdere uitbreidingen zijn met de ontwikkelde en beschreven methode zeker mogelijk. Langs de kant van de externe technologieën is deze gemakkelijk uitbreidbaar waardoor ook zaken als CO₂-kost tot de mogelijkheden behoren. Het boorvelddeel daarentegen is een inzichtelijke methode die mogelijk voor andere toepassingen dan louter deze optimalisatie zou kunnen worden gebruikt.

Bibliografie

- [1] M. Alam, M. Zain, A. B. M Kaish, and Md Jamil. Underground soil and thermal conductivity materials based heat reduction for energy efficient building in tropical environment. *Indoor and Built Environment*, 24:185–200, 03 2015.
- [2] M. Lanahan and Paulo Cesar Tabares-Velasco. Seasonal thermal-energy storage: A critical review on btes systems, modeling, and system design for higher system efficiency. *Energies*, 10, 06 2017.
- [3] NRGeo Natural Resources. Dimensionering boorveld. "<https://www.nrgeo.be/dimensionering-boorveld?lightbox=dataItem-ijzsxlwf>". bezocht op 11-05-2020.
- [4] Tomislav Kurevija, Marija Macenić, and Kristina Strpić. Steady-state heat rejection rates for a coaxial borehole heat exchanger during passive and active cooling determined with the novel step thermal response test method. *Rudarsko Geolosko Naftni Zbornik*, 33:61–71, 02 2018.
- [5] Coefficient of performance – cop – refrigerator, air conditioner. "<https://www.nuclear-power.net/nuclear-engineering/thermodynamics/thermodynamic-cycles/heating-and-air-conditioning/coefficient-of-performance-cop-refrigerator-air-conditioner/>". Bezocht op 04-12-2019.
- [6] Michael J. Moran, Howard N. Shapiro, Margaret B. Bailey, and Daisie D. Boettner. *Fundamentals of Engineering Thermodynamics, 8E International Student Version*. John Wiley & Sons, jan 2015.
- [7] J.M.K.C. Donev et al. Energy education - solar collector [online]. "https://energyeducation.ca/encyclopedia/Solar_collector", 2018. Bezocht op 04-12-2019.
- [8] ICS Cool Energy. De werking van een dry cooler. "<https://www.icscoolenergy.com/nl/drycooler-werking/>". bezocht op 11-05-2020.
- [9] Baltimore Aircoil Company. Vfl-242-hx technische fiche. "<https://www.baltimoreaircoil.eu/en/products/VFL>". bezocht op 11-05-2020.
- [10] J. Berghmans and L. Helsen. *Koelmachines*. VTK cudi, 2011.

-
- [11] L. Helsen. Thermal systems (B-KUL-H0S10a), KU Leuven. Lecture slides (2019).
- [12] Eed version 4 - earth energy designer. "<https://www.buildingphysics.com/manuals/EED4.pdf>". bezocht op 17-11-2019.
- [13] M. Ahmadfard. *A Comprehensive Review of Vertical Ground Heat Exchangers Sizing Models With Suggested Improvements*. PhD thesis, École Polytechnique de Montréal, Canada, 2018.
- [14] Mohammadamin Ahmadfard and Michel Bernier. A review of vertical ground heat exchanger sizing tools including an inter-model comparison. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 110:247 – 265, 2019.
- [15] Modelica language. "<https://www.modelica.org/modelicalanguage>". bezocht op 11-02-2020.
- [16] Alex Laferrière, Massimo Cimmino, Damien Picard, and Lieve Helsen. Development and validation of a full-time-scale semi-analytical model for the short- and long-term simulation of vertical geothermal bore fields. *Geothermics*, 86:101788, 2020.
- [17] Filip Jorissen, Glenn Reynders, Ruben Baetens, Damien Picard, Dirk Saelens, and Lieve Helsen. Implementation and Verification of the IDEAS Building Energy Simulation Library. *Journal of Building Performance Simulation*, 11:669–688, 2018.
- [18] Jonas Cleiren. Optimal integration of geothermal energy with ates and btes. "<https://register.gotowebinar.com/recording/6769192117434348033>". Technical weblecture, Hysopt, 24/10/2019.
- [19] 12 - hybrid ground-source heat pump systems. In Simon J. Rees, editor, *Advances in Ground-Source Heat Pump Systems*, pages 331 – 357. Woodhead Publishing, 2016.
- [20] Leland Blank and Anthony Tarquin. *Engineering economy*. Mcgraw-Hill Education, Europe, feb 2017.
- [21] Damien Picard and Lieve Helsen. *Modeling, Optimal Control and HVAC Design of Large Buildings using Ground Source Heat Pump Systems*. PhD thesis, KU Leuven, België, 2017.
- [22] Mohammadamin Ahmadfard and Michel Bernier. Modifications to ashrae’s sizing method for vertical ground heat exchangers. *Science and Technology for the Built Environment*, 24(7):803–817, 2018.
- [23] M.A. Rosen and S. Koochi-Fayegh. *Geothermal Energy: Sustainable Heating and Cooling Using the Ground*. Wiley, 2017. Pagina 87-88.

-
- [24] Seama Koochi-Fayegh Marc A Rosen. *Geothermal energy: sustainable heating and cooling using the ground*. John Wiley & Sons, 2017.
- [25] Damien Picard. A new hybrid model for borefield heat exchangers performance evaluation. In *ASHRAE: Ground Source Heat Pumps: State of the Art Design, Performance and Research*, volume 120 (2), 06 2014.
- [26] Fleur Loveridge and William Powrie. Temperature response functions (g-functions) for single pile heat exchangers. *Energy*, 57:554–564, 08 2013.
- [27] Michel Bernier. Bore field sizing: Theory and applications. "https://www.kth.se/polopoly_fs/1.574104.1550154719!/Bernier_KTH_final_for_web.pdf", 2015. bezocht op 11-02-2020.
- [28] Saqib Javed. An analytical method to calculate borehole fluid temperatures for time-scales from minutes to decades. *ASHRAE Transactions*, 117:279–288, 01 2011.
- [29] Johan Claesson and Saqib Javed. Explicit multipole formulas for calculating thermal resistance of single u-tube ground heat exchangers. *Energies*, 11:214, 01 2018.
- [30] Kumudu Gamage. *Numerical Methodology For Feasibility Analysis Of Ground Source Heat Pumps*. PhD thesis, METU, Northern Cyprus Campus, 2014.
- [31] Massimo Cimmino. Semi-analytical method for g-function calculation of bore fields with series- and parallel-connected boreholes. *Science and Technology for the Built Environment*, 25(8):1007–1022, 2019.
- [32] Massimo Cimmino. Pygfunction. "<https://pygfunction.readthedocs.io/en/latest/index.html>". bezocht op 11-02-2020.
- [33] Damien Picard. Persoonlijke emailconversatie op 26-02-2020.
- [34] Patricia Monzó Cárcel, Michel Bernier, José Acuña, and Palne Mogensen. A monthly based bore field sizing methodology with applications to optimum borehole spacing. *ASHRAE Transactions*, 122, 01 2016.
- [35] Duncan Pritchard. *What is this thing called knowledge?* Routledge, 2018.
- [36] Robert J Vanderbei et al. *Linear programming*. Springer, 2015.
- [37] J. C. Nash. The (Dantzig) simplex method for linear programming. *Computing in Science Engineering*, 2(1):29–31, 2000.
- [38] John Forrest, John Forrest, Ted Ralphs, and Haroldo Gambini Santos et al. Coin-or branch-and-cut solver. <https://github.com/coin-or/Cbc>, 2020.
- [39] Stuart Mitchell, Stuart Mitchell Consulting, and Iain Dunning. Pulp: A linear programming toolkit for python, 2011.

-
- [40] Dian Yang. *Solution Theory for Systems of Bilinear Equations*. PhD thesis, College of William & Mary, USA, 04 2011.
- [41] LLC Gurobi Optimization. Gurobi optimizer reference manual, 2020.
- [42] Ebrahim Nasrabadi James Orlin. Transformations in integer programming. https://ocw.mit.edu/courses/sloan-school-of-management/15-053-optimization-methods-in-management-science-spring-2013/tutorials/MIT15_053S13_tut09.pdf, 2013. bezocht op 17-05-2020.
- [43] Paul A. Rubin. Perils of 'big m'. <https://orinanobworld.blogspot.com/2011/07/perils-of-big-m.html>, 07 2011. bezocht op 17-05-2020.
- [44] Marten D. Vergaert V., Parys W. Studie naar kostenoptimale niveaus van de minimumeisen inzake energieprestaties van niet-residentiële gebouwen. Technical Report for Vlaamse Energieagentschap: Geel, Belgium, 2015.
- [45] Het Koninklijk Meteorologisch Instituut van België. Klimatologische overzichten van 2019. <https://www.meteo.be/nl/klimaat/klimatologisch-overzicht/2019/januari>. bezocht op 17-05-2020.
- [46] Anita Sant'Anna and Robert Bass. A new two-degree-of-freedom space heating model for demand response. In *SMARTGREENS 2014 - Proceedings of the 3rd International Conference on Smart Grids and Green IT Systems*, 04 2014.
- [47] Y. Tripanagnostopoulos. 3.08 - photovoltaic/thermal solar collectors. In Ali Sayigh, editor, *Comprehensive Renewable Energy*, pages 255 – 300. Elsevier, Oxford, 2012.
- [48] Het Koninklijk Meteorologisch Instituut van België. Tendensen waargenomen te ukkel. <https://www.meteo.be/nl/klimaat/waargenomen-klimatologische-trends/te-ukkel/zonnestraling/zonneschijnduur>. bezocht op 17-05-2020.



De spitskoepel van de Santa Maria del Fiore, Firenze (copyright W. Peere)

“Who could ever be hard or envious enough to fail to praise Pippo [Filippo Brunelleschi] the architect on seeing here such a large structure, rising above the skies, ample to cover with its shadow all the Tuscan people, and constructed without the aid of centering or great quantity of wood? Since this work seems impossible of execution in our time, if I judge rightly, it was probably unknown and unthought of among the ancients.”

- Leon Battista Alberti, Della Pittura, 1434