

Duurzaam verbonden

Een onderzoek naar het verbinden van WKO-systemen

Leon Schoemaker	500688753
Bedrijfsbegeleider:	Ing. H.J. Lammers
HvA-begeleidster:	Dr. Ir. E.J. Pieterse-Quirijns
Datum:	18 September 2017
Afstudeerrichting:	Watermanagement
Versie:	Definitief

Voorwoord

De bachelor Civiele Techniek zit er bijna op. In dit afstudeeronderzoek zal u een onderzoek lezen over het verbinden van warmte- en koudeopslagsystemen. Het onderwerp heb ik gekozen wegens mijn interesses in water en energie. Daarnaast wil ik later graag helpen aan een duurzamere wereld. Met deze twee thema's is dit onderzoek een perfect onderwerp voor mij. In de periode februari 2017 tot en met september 2017 heb ik mij verdiept in de wereld van WKO-systemen en een onderzoek geleverd over het energie-efficiënter maken van WKO-systemen op gebiedsniveau.

Voor dit afstudeeronderzoek wil ik specifiek de volgende mensen bedanken die het voor mij mogelijke hebben gemaakt om dit onderzoek goed uit te voeren en af te ronden. Graag wil ik Ing. Harm Jan Lammers, mijn afstudeerbegeleider van het stagebedrijf, bedanken voor alle tijd die hij in mij gestoken heeft ondanks zijn drukke agenda. Ing. Lammers deelde zijn passies en kennis over het onderwerp en is een uitstekende begeleider.

Verder wil ik ook graag Dr. Ir. Ilse Pieterse-Quirijns, mijn afstudeerbegeleidster van de Hogeschool van Amsterdam, bedanken voor het commenteren van mijn conceptversies en haar steun tijdens het schrijven van het onderzoek. Ook wil ik haar bedanken voor de extra tijd en moeite die ze nam om voor besprekingen naar het stagebedrijf te komen. Ze heeft mij zeer goed begeleidt gedurende het hele afstudeer proces.

Met betrekking tot het verzamelen van gegevens en informatie voor dit onderzoek, zou ik graag nog Thijs Meulen, Nard Hoefnagels, Edwin Adang, Jeffrey Siemes, Toon Buiting en Lambert den Dekker willen bedanken voor het delen van hun kennis en data. Ook bedank ik al de andere personen die mij geholpen hebben tijdens het maken van dit onderzoek en voor de kennis en ervaringen die ze met mij gedeeld hebben.

Tot slot wil ik mijn collega's van Hompe en Taselaar bedanken die mij een goede tijd hebben gegeven bij het stagebedrijf en voor de andere kennis en ervaringen, los van dit onderwerp, die ze hebben gedeeld met mij.

Leon Schoemaker, HBO-Bachelor Student, Civiele Techniek

Amsterdam

18 september 2017

Samenvatting

Aanleiding en vraagstelling

Een veel gebruikte manier om duurzamer met energie om te gaan is ondergrondse energieopslag. Onder deze ondergrondse energieopslag valt warmte- en koudeopslag (WKO). Het algemene principe van een WKO is dat er in de zomer warmte van het gebouw opgeslagen wordt in de bodem, die vervolgens in de winter weer gebruikt kan worden voor verwarming van het huis. Dit werkt ook andersom. In de winter wordt koude van het gebouw opgeslagen in de bodem, vervolgens wordt dit in de zomer gebruikt voor verkoeling van het gebouw. Deze cyclus begint elk jaar opnieuw. Er zijn al veel individuele WKO-systemen, maar nog beperkt collectieve WKO-systemen. Het probleem van veel individuele WKO-systemen is dat de warmte of koude niet optimaal wordt benut, omdat niet elke gebruiker een gelijke warmte- en koude-vraag heeft. Hierdoor ontstaan er overschotten van warmte of koude. Andere gebruikers kunnen wel vraag hebben naar deze overschotten. Een collectief WKO-systeem kan hier een oplossing voor zijn. Door de overschotten met meerdere gebruikers te delen hoeven conventionele systemen minder ingezet te worden voor verwarming en koeling. In dit onderzoek is gekeken naar mogelijkheden van collectieve WKO-systemen vanuit de volgende vraagstelling: *Hoe kan de energie-efficiëntie op gebiedsniveau groter worden door individuele warmte- en koudeopslag te koppelen?*

Resultaten onderzoek principes WKO en praktijksituaties in Nederland

WKO-systemen zijn onder te verdelen in open en gesloten systemen. In dit onderzoek is voornamelijk naar open systemen gekeken. Deze open systemen gebruiken het grondwater als opslagmiddel. In het onderzoek zijn acht praktijksituaties in Nederland onderzocht. Uit deze praktijksituaties is het volgende gebleken:

- uit alle onderzochte projecten blijkt dat de ontwerpwaarden en gerealiseerde waarden verschillen. In de ontwerpen zitten vaak hogere waarden, deze waarden worden in de praktijk vaak niet gehaald. Oorzaken dat de ontwerpwaarden niet gehaald worden zijn:
 - de gebruiker neemt minder af van het WKO-systeem dan dat die zou moeten doen
 - er zijn schommelingen in de jaarlijkse behoefte van de gebruiker
 - er zijn klimatologische invloeden: schommelingen in warmte en koude in gelijke seizoenen
 - er treedt verandering op in de samenstelling/functie van gebouwen.
- uit ervaringen blijkt dat gebouwen met verschillende functies een andere warmte- en koude-vraag hebben (zie onderstaande tabel)

Type gebouw	Warmtevraag	Koude vraag
Kantoor i (warmtevraag)	+	-
Kantoor ii (koude vraag)	-	+
Middelbare school	+	-
Universiteit	+	+
Woning	++	+
Data center	--	+++
Laboratorium	-	++
Sportcentrum	+	-
Zwembad	+++	--

Toelichting: -- = nauwelijks, - = matig, + = veel, ++ = heel veel, +++, extreem veel

- de eerste jaren is er vaak sprake van aanloopproblemen, vanwege een matige afstemming tussen de energiecentrale en gebouwinstallaties. Blijkbaar moet ervaring worden opgedaan met opstarten (opladen van het WKO-systeem), inregelen en fine-tunen van systemen voordat de gewenste energiebalansen worden bereikt
- individuele systemen zijn veelal gebonden aan één gebouw. Dat maakt aansturing en beheer eenvoudig. Bij collectieve systemen ligt dit complexer. Meestal ligt het beheer van het collectieve systeem in één hand, maar zijn er meerdere gebruikers, met ieder hun eigen wensen. Er moet dan een goede afstemming plaatsvinden tussen de beheerder en de gebruikers
- WKO-systemen kunnen volgens de ervaringen op twee manieren verbonden worden tot collectieve systemen, namelijk met een ringleiding of thermisch.

Keuzemenu voor het koppelen van WKO-systemen

Naast deze ervaringen met praktijksituaties in Nederland is beschreven welke varianten van WKO-systemen met elkaar gekoppeld kunnen worden en op welke onderdelen een WKO-systeem met een ander WKO-systeem gekoppeld kan worden. Om tot een optimale koppeling voor een collectief systeem in een gebied te komen is een 'keuzemenu' ontwikkeld. De variabelen in dit keuzemenu zijn:

- de soort vraag van de gebruikers in het gebied
- de opbouw van de ondergrond
- de risico's die de gebruikers in het gebied willen delen.

Deze variabelen zijn niet van een zelfde 'orde' maar kunnen wel worden gebruikt om tot een 'keuzemenu' te komen. Een bepaalde combinatie levert een voorkeur voor een soort collectief WKO-systeem op. Het keuzemenu dat op basis hiervan is ontwikkeld is als volgt:

1. Gebruikers in het gebied hebben gelijktijdig warmte- of koude-vraag: *ringleiding met collectieve warmtepomp, twee-pijpsysteem*
2. Gebruikers in het gebied hebben gelijktijdig warmte- én koude-vraag: *ringleiding met collectieve warmtepomp, vier-pijpsysteem*
3. Gebruikers in het gebied hebben gelijktijdig een verschillende warmte- of koude vraag: *ringleiding met individuele warmtepompen, twee-pijpsysteem*
4. Gebruikers in het gebied hebben gelijktijdig een verschillende warmte- én koude-vraag: *ringleiding met individuele warmtepompen, vier-pijpsysteem*
5. De opbouw van de ondergrond levert beperkingen op: (a) bij dunne aquifer: *doubletsysteem als aanvulling op bestaande systemen* en (b) er zijn al veel bronnen ('druk gebied'): *recirculatiesysteem of mono-systeem als aanvulling op bestaande systemen*
6. Een (aantal) gebruiker(s) in het gebied wil/willen de risico's in hun energievoorziening niet met andere gebruikers delen: *thermische verbinding*.

Casestudie Amsterdam Zuidas

In het onderzoek is ook een casestudie uitgevoerd, namelijk in Amsterdam Zuidas. In de casestudie is er gekeken of een collectieve WKO-systeem daadwerkelijk energie-efficiënter is dan individuele WKO-systemen. Er is met behulp van het keuzemenu een collectief WKO ontwerp gemaakt voor het gebied Zuidas Noord. Om tot het ontwerp te komen zijn er 6 stappen uitgevoerd:

- Stap 1: afbakenen van het gebied en typering van de gebouwen
- Stap 2: vaststellen uitgangspunten voor de berekeningen
- Stap 3: berekenen van de energievraag van de gebouwen

- Stap 4: uitwerken varianten: nul-variant en twee varianten voor koppeling
- Stap 5: vergelijken van de varianten
- Stap 6: samenvatting en oordeel: welke variant heeft de voorkeur?

Uit het onderzoek is gebleken dat de gebouwen in het gebied Zuidas Noord gezamenlijk iets meer een warmte- dan een koude-behoefte hebben. Momenteel wordt niet alle warmte- en koude-behoefte van de gebouwen ingevuld met WKO-systemen. Zeker voor de (extra) koude-vraag worden conventionele systemen gebruikt. Met de casestudie Zuidas Noord is de invulling op de behoeftes van het gebied van individuele WKO-systemen (nul-variant) vergeleken met twee varianten van collectieve WKO-systemen. De varianten zijn als volgt:

- nul-variant: laat zien wat de invulling van de energiebehoefte is wanneer elk gebouw een individueel WKO-systeem heeft
- variant 1: bestaande en toekomstige WKO-systemen koppelen met ringleiding
- variant 2: geheel nieuw collectief WKO-systeem met ringleiding.

Met behulp van het keuzemenu komt naar voren dat de twee collectieve varianten ontworpen worden met een ringleiding. Via ringleidingen kan de warmte en koude uit de bronnen efficiënter benut worden voor de behoefte van de gebouwen in het gebied (een mix van scholen, kantoren en woningen). De warmte en koude die bij individuele WKO-systemen niet benut wordt, kan namelijk bij collectieve systemen uitgewisseld worden tussen andere gebouwen. Daarnaast is bij een collectief WKO-systeem de behoefte op gebiedsniveau meer in te vullen. Met behulp van een toekomstige collectief WKO-systeem kan de conventionele invulling verlaagd of overbodig worden. In de tabel hieronder is de besparing van de twee collectieve varianten te zien ten opzichte van de nul-variant. In de toekomst kunnen nieuwe gebouwen in de omgeving ook aangesloten worden op het collectieve WKO-systeem. Hiermee kan het gebruik van conventionele systemen nog verder worden teruggebracht (zie rechter kolom tabel).

	Besparing warmte	Besparing koude	Aantal benodigde bronnen	Aantal woningen om overige koude in te vullen
Nul-variant	n.v.t	n.v.t.	28	
Variant 1	100%	17%	24	Ca. 6.000
Variant 2	100%	44%	18	Ca. 4.900

Uit de casestudie komt verder naar voren dat:

- de collectieve varianten het meeste energie-efficiëntie op gebiedsniveau leveren in vergelijking met de nul-variant
- de piekmomenten van warmte- of koude-vraag bij collectieve WKO-systemen lager zijn
- bij de collectieve varianten neemt de complexiteit van het leidingennetwerk toe vanwege de benodigde aanleg van een ringleiding
- bij variant 2 kan de aquifer beter benut worden dan in de nul-variant.

Conclusies en aanbevelingen

Vanuit het onderzoek zijn de volgende conclusies te trekken.

- De energiewinsten bij collectieve WKO-systemen kunnen groot zijn, zeker wanneer de aanloopproblemen zijn overwonnen. Het is belangrijk dat er één beheerder aan gesteld wordt,

omdat individuele gebruikers moeite hebben om een eigen maximale invulling te regelen (voordeel van schaalgrootte).

- Er is een keuzemenu ontwikkeld om de optimale koppeling van open WKO-systemen te bepalen. Bij fysiek verbinden van WKO-systemen heeft verbinden via een ringleiding de voorkeur. Thermisch koppelen heeft de voorkeur wanneer beheerders verschillende belangen hebben of risico's willen spreiden.
- Uit de berekeningen uit de casestudie blijkt dat de warmtebehoefte volledig via een collectief WKO-systeem kan worden ingevuld (100%), terwijl de koude-behoefte grotendeels (72 – 77%) kan worden ingevuld. Door deze collectiviteit worden gebouwen minder afhankelijk van conventionele energiebronnen. Geconcludeerd kan worden dat een goede mix van warmte- en koude-vraag één van de belangrijkste succesfactoren voor een collectief WKO-systeem is. Indien meer gebouwen aangesloten worden op het collectieve WKO-systeem kunnen hogere rendementen behaald worden. Wanneer er onvoldoende mix is van warmte- en koude-vraag heeft een individueel WKO-systeem de voorkeur.
- Op grond van de casestudie kan geconcludeerd worden dat de energie van gekoppelde WKO-systemen op grotere schaal (met meerdere gebouwen) efficiënter gedeeld en benut kan worden. Dit levert tevens een reducering van gebruik van conventionele energiebronnen op.

Dit alles leidt tot de volgende aanbevelingen voor verder onderzoek.

- Onderzoek de mogelijke gebiedsomvang van collectieve WKO-systemen
Het is interessant om te weten hoe groot de omvang van een collectief WKO-systeem met een ringleidingen kan zijn. Wanneer er bekend is hoe groot het energieverlies per meter is in de leidingen, kan er eenvoudig bepaald worden of het toepassen van een collectief WKO-systeem op een bepaald gebiedsniveau nog rendabel is.
- Onderzoek de mogelijkheid om collectieve WKO-systemen te verbinden met andere duurzame energieopwekkingssystemen.

Inhoudsopgave

Voorwoord	1
Samenvatting.....	2
Lijst met figuren.....	9
Lijst met tabellen.....	11
1. Inleiding	12
1.1 Aanleiding.....	12
1.2 Doel en vraagstelling	13
1.3 Afbakening.....	14
1.4 Leeswijzer	15
2. Overzicht WKO-systemen.....	16
2.1 Inleiding	16
2.2 Principe WKO-systeem	16
2.3 Open WKO-systemen	18
2.3.1 Principes van het open WKO-systeem	18
2.3.2 Varianten van het open WKO-systeem	19
2.4 Gesloten WKO-systemen.....	24
2.4.1 Principes van het gesloten WKO-systeem.....	24
2.4.2 Varianten van het gesloten WKO-systeem.....	24
2.5 WKO-systeem: onttrekkingsgebied, systeemonderdelen en thermische balans	28
2.5.1 Onttrekkingsgebied (open systemen)	28
2.5.2 Waterpompen en filters (open systemen)	29
2.5.3 Circulatiepompen (gesloten systemen).....	30
2.5.4 Leidingen en kleppen	30
2.5.5 Warmtewisselaar.....	31
2.5.6 Warmtepomp	32
2.5.7 Meet- en regelsysteem.....	33
2.5.8 Thermisch balans en interferentie	33
2.6 Samenvatting individuele WKO-systemen	36
3. De praktijk van verschillende soorten WKO-projecten.....	38
3.1 Inleiding	38
3.2 Individuele mono WKO-systemen.....	39
3.2.1 Monobron ARAG Rechtsbijstand in Leusden	39
3.2.2 Monobron St. Nicolaaslyceum in Amsterdam-Zuid	40
3.3 Individuele doublet WKO-systemen.....	41
3.3.1 Hoofdkantoor Miele Nederland B.V. in Vianen.....	41

3.3.2	Gebouw Groot Advocatenkantoor in Amsterdam	44
3.4	Individuele recirculatie WKO-systemen	46
3.5	WKO-systemen met warmtepomp en cv-ketel.....	47
3.6	Collectieve doublet WKO-systemen.....	48
3.6.1	Radboud Universiteit in Nijmegen	48
3.6.2	TU Eindhoven	53
3.7	Thermisch verbinden van WKO-systemen	56
3.7.1	Definitie thermisch verbinden.....	56
3.7.2	Sciencepark UvA en datacenter Equinix.....	56
3.8	Samenvatting.....	58
4.	Koppelen van WKO-systemen	60
4.1	Inleiding	60
4.2	Het koppelen van WKO varianten	60
4.2.1	Koppeling mono- en doubletsysteem	60
4.2.2	Koppeling recirculatie- met mono- of doubletsysteem	63
4.3	Koppeling op onderdelen van WKO-systemen	65
4.3.1	Ringleidingen	65
4.3.2	Individuele en collectieve warmtepomp.....	70
4.3.3	Thermisch verbinden.....	72
4.4	Samenvatting.....	73
5.	Casestudie Amsterdam Zuidas	77
5.1	Inleiding	77
5.2	Stap 1: afbakening gebied en typering gebouwen.....	77
5.3	Stap 2: uitgangspunten voor de berekeningen	79
5.3.1	Kengetallen warmte- en koude-vraag verschillende soorten gebouwen	79
5.3.2	Gebruik beschikbare gegevens bestaande WKO-systemen	81
5.3.3	Gegevens geplande WKO-systemen	82
5.4	Stap 3: berekenen van de energievraag van de gebouwen	83
5.5	Stap 4: varianten WKO-systemen casestudie Zuidas Noord.....	85
5.5.1	Inleiding	85
5.5.2	Nul-variant: individuele WKO-systemen	85
5.5.3	Variant 1: collectief WKO-systeem gecombineerd met bestaande WKO-systemen	91
5.5.4	Variant 2: geheel nieuw collectief WKO-systeem	96
5.6	Stap 5: vergelijking van de varianten casestudie Zuidas Noord.....	100
5.7	Stap 6: Samenvatting en oordeel casestudie Zuidas Noord.....	102
6	Conclusie	103
	Literatuurlijst	107
	Bijlage 1 Ervaringen met WKO-systemen.....	110

Bijlage 1.1 Gegevens Miele Nederland B.V.	110
Bijlage 1.2 Gegevens GGA	111
Bijlage 1.3 Gegevens Radboud Universiteit	117
Bijlage 1.4 Gegevens TU Eindhoven	118
Bijlage 1.5 Gegevens Science Park UvA.....	119
Bijlage 2 Casestudie Zuidas Noord	120
Bijlage 2.1 Uitleg berekeningen.....	120
Bijlage 2.2 Ontwerpwaarden.....	123
Bijlage 2.3 Collectieve WKO-systeem ontwerpen: toelichting ringleiding.....	125

Lijst met figuren

Figuur 1: Principe van een WKO-systeem (links) met de verschillende onderdelen (midden en rechts)	17
Figuur 2: Overzicht van verschillende type WKO-systemen	17
Figuur 3: Overzicht van individuele WKO-systemen gecombineerd met conventionele energie	18
Figuur 4: Opbouw van een open WKO-systeem	19
Figuur 5: Weergave van een mono-WKO-bron	20
Figuur 6: Twee individuele monobronnen met positieve interferentie.....	20
Figuur 7: Principe van een doublet WKO-bron	21
Figuur 8: Principe van een Recirculatiesysteem.....	23
Figuur 9: Opbouw van een gesloten WKO-systeem.....	25
Figuur 10: Principe verticale WKO-systemen	25
Figuur 11: Schematisch weergave horizontaal WKO-systeem.....	26
Figuur 12: Principe horizontale WKO-systemen	27
Figuur 13: Doorsnede van een ondergrond met aquiferzones	29
Figuur 14: Waterpompen en filters in open WKO-systemen	29
Figuur 15: Circulatiepompen in een gesloten WKO-systeem.....	30
Figuur 16: Leidingen en kleppen	31
Figuur 17: De warmtewisselaar	31
Figuur 18: Principe warmtewisselaar	32
Figuur 19: Werkingsprincipe warmtepomp	32
Figuur 20: Bovenanzicht van thermische bellen, voorbeeld Zuidas Amsterdam.....	34
Figuur 21: Negatieve interferentie.....	35
Figuur 22: Overzicht van meer-jaren thermische balans van de WKO Chassépark in Breda.....	36
Figuur 23: Energiebalans van de monobron ARAG Rechtsbijstand	39
Figuur 24: WKO Balans van de monobron bij het St. Nicolaaslyceum	40
Figuur 25: WKO-systeem Miele in Vianen (doubletbron)	42
Figuur 26: Energiebalans WKO-systeem Miele in Vianen (doubletbron).....	43
Figuur 27: Gasverbruik per maand van GGA 2015 – 2016	44
Figuur 28: Energiebalans 2014 WKO-systeem GGA (doubletbron)	45
Figuur 29: Energiebalans 2016 WKO-systeem GGA (doubletbron)	46
Figuur 30: Inzet conventionele cv-ketel in WKO-systeem	47
Figuur 31: Principe All Electric Warmtepomp	48
Figuur 32: Overzicht van het WKO-systeem Radboud Universiteit (collectief doubletsysteem)	49
Figuur 33: Verloop energiebalans WKO-systeem Radboud Universiteit (collectief doubletsysteem) .	49
Figuur 34: Verloop energiebalans WKO-systeem Radboud Universiteit (collectief doubletsysteem) .	50
Figuur 35: Twee-pijpen leidingennet Radboud Universiteit (collectief doubletsysteem)	50
Figuur 36: Energieverbruik van de Radboud Universiteit in de periode 2008 tot 2016	51
Figuur 37: Opwekking met WKO-systeem en de primaire energieverbruik van de Radboud Universiteit	52
Figuur 38: Schema van het collectieve WKO-systeem TU Eindhoven.....	53
Figuur 39: Ringleidingnet van het WKO-systeem TU Eindhoven (collectief doubletsysteem)	54
Figuur 40: Overzicht van behaalde temperatuurverschillen van de TU Eindhoven.....	56

Figuur 41: Warmte en koude levering WKO-systeem Science Park UvA (thermisch verbonden systeem)	57
Figuur 42: Koppeling mono met doublet, met monobron tussen de doubletbellen.....	61
Figuur 43: Koppeling mono met doublet, met koude interferentie van bellen.....	62
Figuur 44: Doubletten gekoppeld op retourleiding en doubletten thermisch gekoppeld.....	63
Figuur 45: Recirculatie gekoppeld op retourleiding en recirculatie thermisch gekoppeld.....	64
Figuur 46: Recirculatiesysteem onttrekt uit een overschot.....	65
Figuur 47: Principe van twee-pijpsysteem	66
Figuur 48: Principe van een collectief WKO-systeem met één aanvoer- en retourleiding.....	67
Figuur 49: Principe van warmte koude uitwisseling met twee leidingen	68
Figuur 50: Principe van vier-pijpsysteem	68
Figuur 51: Principe van een collectief WKO-systeem met twee aanvoer- en twee retourleidingen....	69
Figuur 52: Principe van een collectief WKO-systeem met individuele warmtepomp	70
Figuur 53: Principe van een collectief WKO met collectieve warmtepomp.....	71
Figuur 54: (On)georganiseerde aanleg van WKO-systemen	73
Figuur 55: Keuzemenu in een vorm van een beslisboom	76
Figuur 56: Kaart van de Zuidas met de afbakening van het gebied (rood) voor de casestudie.....	78
Figuur 57: Het onderzoeksgebied voor de casestudie Zuidas Noord in detail.....	79
Figuur 58: Invulling van de bestaande WKO-systemen op de warmte- en koude-behoefte van de gebouwen.....	86
Figuur 59: Schematische weergave van de bestaande gebouwen met WKO-systemen	86
Figuur 60: Overzicht van de toegevoegde warmte en koude aan de bodem.....	87
Figuur 61: Invulling van de geplande WKO-systemen op de warmte- en koude-behoefte van de herontwikkelingsgebouwen	88
Figuur 62: Schematische weergave van de individuele WKO-systemen van de herontwikkelingsgebouwen	88
Figuur 63: Overzicht van nul-situatie	89
Figuur 64: Kaart Zuidas Noord met de positionering van de individuele WKO-systemen (nul-variant)90	
Figuur 65: Invulling van het collectieve WKO-systeem variant 1	93
Figuur 66: Kaart Zuidas Noord met het collectieve WKO-systeem variant 1 (ontwerp).....	95
Figuur 67: Schematische weergave van het collectieve WKO-systeem variant 1.....	96
Figuur 68: Invulling van het collectieve WKO-systeem variant 2	97
Figuur 69: Kaart Zuidas Noord met het collectieve WKO-systeem variant 2 (ontwerp).....	99
Figuur 70: Schematische weergave van het collectieve WKO-systeem variant 2	100
Figuur 71: Invulling van WKO-systemen op de totale behoefte van alle gebouwen.....	101
Figuur 72: De cumulatieve CO ₂ -uitstoot reductie van Miele door het gebruiken van een WKO-systeem.	110
Figuur 73: Grafische weergaven van het elektraverbruik in de periode januari 2006 tot december 2016.....	111
Figuur 74: Grafische weergaven van het gasverbruik in de periode januari 2015 t/m december 2016 GGA.....	112
Figuur 75: Principe van COP-waarde.....	120
Figuur 76: Vier thermische clusters in het gebied.....	124
Figuur 77: Principe en doorsnede van de ringleiding.....	126

Lijst met tabellen

Tabel 1: Eigenschappen van de WKO-systemen.	36
Tabel 2: Ontwerpgegevens van de monobron St. Nicolaaslyceum.....	40
Tabel 3: Toegevoegde warmte en koude aan de bodem van het St. Nicolaaslyceum (monobron)	41
Tabel 4: Besparingen WKO-systeem Miele in Vianen (doubletbron).....	42
Tabel 5: Ontwerpwaarden van WKO-systeem GGA (doubletbron)	44
Tabel 6: Overzicht totale jaaropgave WKO-systeem GGA 2014 en 2016	45
Tabel 7: Duurzame energie opwekking en totale energieverbruik van de Radboud Universiteit	52
Tabel 8: Elektraverbruik en –vergelijking TU Eindhoven in de periode 2005 tot 2015.....	55
Tabel 9: Gasverbruik en -vergelijking TU Eindhoven in de periode 2005 tot 2015.....	55
Tabel 10: Totaal energieverbruik en -vergelijking TU Eindhoven in de periode 2005 tot 2015	55
Tabel 11: Verschillen in warmte- en koude-vraag per type gebouw	58
Tabel 12: Overzicht van voor- en nadelen per type warmtepomp	72
Tabel 13: Vergelijking Individuele met collectieve WKO-systemen	74
Tabel 14: Een overzicht van de gebouwen die onderzocht worden in de casestudie	79
Tabel 15: Overzicht van warmte en koude kengetallen van 3 type gebouwen	80
Tabel 16: Overzicht van koude kengetallen voor het Atrium kantoorgebouw	80
Tabel 17: Behoeftte en niet ingevulde MWh in bestaande WKO-systemen.....	83
Tabel 18: Gegevens van bestaande WKO-systemen (2016)	83
Tabel 19: Behoeftte en niet ingevulde MWh in geplande WKO-systemen (herontwikkelingsgebouwen)	84
Tabel 20: Gegevens van geplande-WKO-systemen (herontwikkelingsgebouwen)	84
Tabel 21: Overzicht nul-situatie en invulling collectieve WKO-systeem	91
Tabel 22: Ontwerpgegevens van het collectieve WKO-systeem variant 1	93
Tabel 23: Warmte- en koude-behoeftte in variant 2	97
Tabel 24: Ontwerpwaarden van het collectieve WKO-systeem variant 2	98
Tabel 25: Besparing van collectieve WKO-systemen in vergelijking met individuele WKO-systemen	101
Tabel 26: Elektraverbruik per maand van GGA 2015.....	111
Tabel 27: Elektraverbruik per maand van GGA 2015.....	111
Tabel 28: Gasverbruik per maand van GGA 2015.	112
Tabel 29: Gasverbruik per maand van GGA 2016.	112
Tabel 30: Jaaropgave 2014 van WKO-systeem GGA (koeling)	112
Tabel 31: Jaaropgave 2014 van WKO-systeem GGA (verwarming)	113
Tabel 32: Jaaropgave 2016 van WKO-systeem GGA (koeling)	113
Tabel 33: Jaaropgave 2016 van WKO-systeem GGA (verwarming)	114
Tabel 34: Overzicht van de berekende warmte- en koude- behoefte GGA.....	115
Tabel 35: Gasverbruik GGA en de geleverde warmte en koude van het WKO-systeem	116
Tabel 36: Overzicht van energieverbruik in de periode 2008 tot en met 2015 Radboud Universiteit	117
Tabel 37: Elektra- en gasverbruik van de gebouwen die aangesloten zijn op het WKO-systeem	118
Tabel 38: Warmte en koude levering van WKO-systeem aan de gebouwen.....	118
Tabel 39: Jaargegevens 2011 WKO-systeem Science Park UvA (thermisch verbonden systeem).....	119
Tabel 40: Ontwerpgegevens van WKO-systemen van de bestaande gebouwen	123
Tabel 41: Ontwerpgegevens van individuele WKO-systemen van de herontwikkelingsgebouwen...	124
Tabel 42: Ontwerpgegevens van het collectief WKO-systeem	124

1. Inleiding

1.1 Aanleiding

Wereldwijd komt er een steeds grotere druk vanuit de bevolking en de overheid om duurzamer met energie om te gaan. Zo hebben tot nu toe 174 landen het klimaatakkoord van Parijs ondertekend (United Nations, 2017). In dit akkoord hebben de landen onder andere afgesproken dat de temperatuur op aarde niet meer dan 2 graden mag stijgen ten opzichte van het pre-industrialisatie tijdperk (United Nations, 2015). Om dit te bereiken zullen de landen zo snel mogelijk hun best moeten doen om de uitstoot van broeikasgassen en schadelijke stoffen te verminderen. Nederland is één van de 174 landen die het akkoord ondertekend heeft en aan het implementeren is (Rijksoverheid, 2017). Los van het klimaatakkoord van Parijs heeft Nederland zelf ook de doelstelling om in 2020 14%, in 2026 16% en in 2050 zelfs 95% van de energiebehoefte duurzaam op te wekken (Rijksoverheid, 2017). Hiervoor zijn echter wel de nodige maatregelen nodig, gezien anno 2016 slechts 5.9% van de energiebehoefte duurzaam werd opgewekt in Nederland (CBS, 2017). Los van het milieu en de leefomgeving heeft Nederland ook nog andere baten bij een duurzamer energiebeleid. Voor de huidige energievoorziening is Nederland erg afhankelijk van het buitenland voor veel van zijn fossiele brandstoffen. Vaak zijn deze fossiele brandstoffen afkomstig uit zogenoemde risicolanden, zoals Rusland en het Midden-Oosten (EnergyPost, 2016). Ook onze eigen gaswinning uit Groningen staat momenteel erg onder druk door het lokale effect op de leefomgeving. De overheid is gedwongen om deze gaswinning langzaam dicht te draaien (ICIS, 2017). Dit alles vraagt om een duurzamere manier om met energie om te gaan in Nederland.

Een veel gebruikte manier om duurzamer met energie om te gaan is ondergrondse energieopslag. Onder deze ondergrondse energieopslag valt warmte- en koudeopslag (WKO). WKO is een techniek waarmee, zoals de naam al doet vermoeden, warmte en koude opgeslagen kan worden in de grond (RIVM, 2009). Deze warmte of koude kan dan, wanneer er vraag naar is, op een later tijdstip worden opgehaald (Agentschap NL, November 2011). Bijvoorbeeld, in de zomer wordt het gebouw warm. De in deze periode overtollige warmte wordt opgeslagen in de bodem. Deze warmte wordt in de winter, wanneer er een warmte tekort is, weer opgepompt om het gebouw te verwarmen. Dit principe werkt ook andersom. Wanneer het koud is in de winter wordt de koude opgeslagen in een andere bron in de grond. Deze koude kan in de zomer gebruikt worden om het gebouw te koelen. Dit vormt een duurzame energiebron om een gebouw te verwarmen of te verkoelen. Bovendien vindt er, in ieder geval lokaal, geen verbranding van aardolie, aardgas of steenkool plaats om te verwarmen of te koelen (RIVM, 2009). Met andere woorden, verwarmen of koelen met WKO-systemen leidt tot een grote reducering van broeikasgassen en schadelijke stoffen, zoals koolstofdioxide (CO₂), zwaveldioxide (SO₂) en stikstofoxide (NO₂).

WKO is niet een nieuwe techniek. Al in de jaren 90 zijn de eerste gebouwen voorzien van WKO-systemen (van der Korgt, 2011). Sinds eind jaren negentig neemt het aantal gebouwen met WKO-systemen snel toe. WKO-systemen worden toegepast bij bedrijventerreinen, industrie, glastuinbouw en woningbouw (RIVM, 2009). De vraag naar duurzame energie stijgt. Dit is uiteraard goed voor het halen van bovengenoemde (milieu) doelstellingen.

Met de toename van de toepassing van WKO stijgt ook het ondergronds ruimtegebruik. Een goede afstemming van het ondergronds ruimtegebruik is noodzakelijk. Door een gebrek aan gerichte regelgeving over bodemenergiesystemen zijn er onduidelijkheden over de verdeling van ruimte in het grondwater en de registratie (RIVM, 2009).

Vandaag de dag worden de meeste WKO-systemen in Nederland nog steeds op individuele basis geïnstalleerd. Dit betekent dat elk WKO-systeem op zichzelf staat. Het kan zijn dat gebouwen met een individuele WKO-systeem in een gebied verschillende verhoudingen hebben in warmte- en koude-vraag. Dit kan komen door de functie of wensen van een gebouw. In deze verschillende vraag naar warmte en koude kan een mogelijkheid zitten om energie met elkaar te delen, en zo het aandeel van de WKO bij de invulling van de energiebehoefte op gebiedsniveau¹ efficiënter te benutten. Een gebouw met een hoge warmtevraag zal meer gebruik maken van de warmte bron dan van de koude bron. Wanneer er bijvoorbeeld een gebouw in de omgeving ligt die juist een hoge koude-vraag heeft en daarom veel van de koude bron gebruikt, is het wellicht mogelijk om de bronnenenergiebalans van deze gebouwen te optimaliseren en niet gebruikte warmte en koude uit te wisselen met andere gebruikers. Door individuele WKO-systemen met elkaar te koppelen kan dit probleem wellicht opgelost worden. In dit onderzoek komen cases aan bod waar er al wel gekoppeld is.

Door zowel het individuele karakter van WKO-systemen en de onduidelijkheden met betrekking tot de bodemruimteverdeling, zijn verschillende WKO-systemen slecht op elkaar afgestemd. Slecht op elkaar afgestemde WKO-systemen kunnen negatief met elkaar interfereren. Dit heeft als gevolg dat het rendement van deze WKO-systemen achteruit gaat en er weer meer beroep gedaan moet worden op conventionele verwarming- en verkoeling-systemen (Stuurman, et al., 2010).

1.2 Doel en vraagstelling

Gezien bovengenoemde knelpunten is het de vraag of het koppelen van de individuele WKO-systemen het totale systeem efficiënter kan maken in termen van rendement en mogelijk ook kan leiden tot minder afhankelijkheid van aanvulling van energie uit conventionele systemen.

Het doel van dit onderzoek is om te zoeken naar mogelijkheden voor het verbeteren van de energie-efficiëntie² op gebiedsniveau van individuele WKO-systemen. Dit door middel van inzicht te geven over ervaringen met WKO-koppelingen in Nederland en deze te gebruiken als basis voor een ontwerp van een collectief WKO-systeem. Deze onderzoeksdoelen zijn vertaald naar de volgende centrale vraag van dit onderzoek:

Hoe kan de energie-efficiëntie op gebiedsniveau groter worden door individuele warmte- en koudeopslag te koppelen?

Om deze hoofdvraag systematisch te beantwoorden is deze opgedeeld in de volgende deelvragen:

1. *Wat voor WKO-systemen zijn er?*
2. *Wat zijn de ervaringen bij uitgevoerde WKO-projecten in Nederland?*
3. *Welke varianten van WKO-systemen kunnen met elkaar gekoppeld worden?*

¹ Gebiedsniveau: het gebied waarbinnen een collectief WKO-systeem werkzaam is.

² Energie-efficiëntie: is de mate van afstemming van warmte- en koude-behoeftes van gebouwen.

4. *Op welke onderdelen van een WKO-systeem kan er met een ander WKO-systeem een koppeling worden gemaakt?*
5. *Op welke wijze kan de energie-efficiëntie in een gebied worden vergroot door het inrichten van een collectief WKO-systeem?*

Deze vragen zijn in dit onderzoek beantwoord aan de hand van:

- literatuurstudie
- analyse praktijksituaties
- analyse verkregen documenten van WKO-systemen
- interviews met experts
- casestudie Zuidas

Naast literatuuronderzoek zijn er interviews met diverse experts van praktijksituaties gehouden. De praktijksituaties uit het onderzoek zijn verschillende WKO-projecten in Nederland. De interviews zijn uitgeschreven en geanalyseerd. Op basis van de literatuur, interviews en analyse van het verkregen datamateriaal is een ontwerp gemaakt voor de casestudie Zuidas. Vervolgens zijn de conclusies van dit onderzoek getrokken.

1.3 Afbakening

Een WKO-systeem is op te delen in open en gesloten systemen. Het is belangrijk om te noemen dat dit onderzoek zich voornamelijk richt op open WKO-systemen. Van gesloten systemen wordt wel het principe uitgelegd, maar er wordt niet gekeken naar eventuele verbindingen. De reden hiervoor is dat gesloten systemen eigenlijk alleen geschikt zijn voor kleinere projecten, zoals woningen en kleinere kantoren/scholen en dat de omvang van het onderzoek anders te groot wordt.

Verder gaat dit onderzoek niet in op beleid-, financiële- en juridische aspecten met betrekking tot WKO-systemen. Het doel van deze scriptie is om te onderzoeken hoe de energie-efficiëntie op gebiedsniveau groter kan worden door individuele warmte- en koudeopslag te koppelen. Om die reden zal dit onderzoek zich voornamelijk focussen op de technische aspecten van open WKO-systemen en zijn gerelateerde koppelmogelijkheden.

Dit brengt ons naar de theoretische en praktische relevanties van dit onderzoek. Dit onderzoek heeft twee theoretische relevanties. Ten eerste geeft dit onderzoek een review van de verschillende WKO-systemen die in omloop zijn. Ten tweede levert dit onderzoek een bijdrage aan de mogelijke koppelingen en interacties van verschillende WKO-systemen. De praktische relevantie van dit onderzoek is dat het verschillende oplossingen geeft over hoe WKO-systemen efficiënter en effectiever kunnen worden ingezet doormiddel van koppelingen. Deze oplossingen kunnen gebruikt worden door zowel beleidsmakers, gebiedsontwikkelaars als bedrijven in hun besluitvormingen over WKO-systemen.

1.4 Leeswijzer

Deze scriptie is als volgt opgebouwd. In hoofdstuk 2 worden eerst de conceptuele principes van WKO-systemen beschreven. Vervolgens wordt deelvraag 1 beantwoord door een gedetailleerde beschrijving te geven van de verschillende WKO-systemen die er momenteel beschikbaar zijn. Ook worden de belangrijkste systeemonderdelen toegelicht. Hoofdstuk 3 staat in het teken van deelvraag 2. In dit hoofdstuk worden verschillende praktijksituaties in Nederland beschreven en geanalyseerd. De beschreven praktijksituaties maken ieder gebruik van individuele of collectieve WKO-systemen. Na de analyses van de praktijksituaties wordt in hoofdstuk 4 gekeken hoe verschillende WKO-systemen gekoppeld kunnen worden. Dit gebeurt zowel op systeem- als op onderdeelniveau. In hoofdstuk 4 worden daarmee de deelvragen 3 en 4 beantwoord. In hoofdstuk 5 wordt voor het gebied Zuidas-Noord in Amsterdam een casestudie gedaan. In deze casestudie wordt gekeken in hoeverre het mogelijk is individuele WKO-systemen (bestaande en geplande) te koppelen tot een collectief WKO-systeem. Daarbij zal worden beoordeeld wat dit voor gevolgen kan hebben voor de energiebalans van de aangesloten complexen. Ook wordt besproken welke stappen er kunnen worden gezet om tot een collectief WKO-systeem te komen. In hoofdstuk 6 worden conclusies getrokken en de implicaties van de bevindingen bediscussieerd. Een sectie in dit hoofdstuk behandelt ook de beperkingen van dit onderzoek en geeft, aan de hand daarvan, richtingen voor verder onderzoek.

2. Overzicht WKO-systemen

2.1 Inleiding

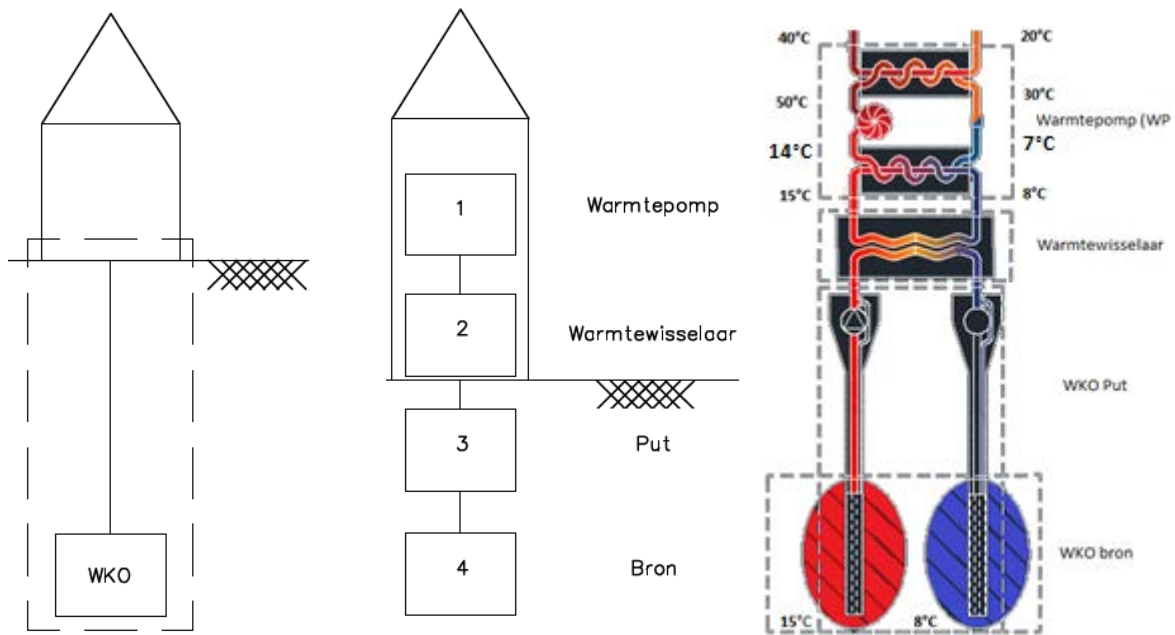
Het doel van dit hoofdstuk is om een duidelijk beeld te geven van (1) het principe van warmte- en koudeopslag (WKO), (2) het verschil tussen open en gesloten systeem en (3) welke soorten hierbinnen weer te onderscheiden zijn. Om een mogelijke koppeling tussen WKO-systemen te onderzoeken is het nodig om de soorten en de werking van de te onderscheiden WKO-systemen te kennen. In dit hoofdstuk zal daarmee deelvraag 1 worden behandeld: *welke WKO-systemen zijn er?*

De verschillende onderdelen van een WKO-systeem worden toegelicht. Van de filterbron tot en met het afgiftesysteem van het gebouw worden de functies en werkingen uitgelegd. Het hoofdstuk is als volgt opgebouwd. Paragraaf 2.2 gaat in op de basisprincipes van een WKO-systeem. In paragraaf 2.3 komen open systemen aan de orde. Paragraaf 2.4 staat in het teken van diverse gesloten WKO-systemen. Paragraaf 2.5 bespreekt alle onderdelen die voorkomen in de bovengenoemde WKO-systemen. De meeste onderdelen komen bij elk WKO-systeem terug. Sommige onderdelen worden alleen toegepast bij een bepaald WKO-systeem, dit zal dan worden aangegeven. Het hoofdstuk wordt afgerond met een samenvatting (2.6).

2.2 Principe WKO-systeem

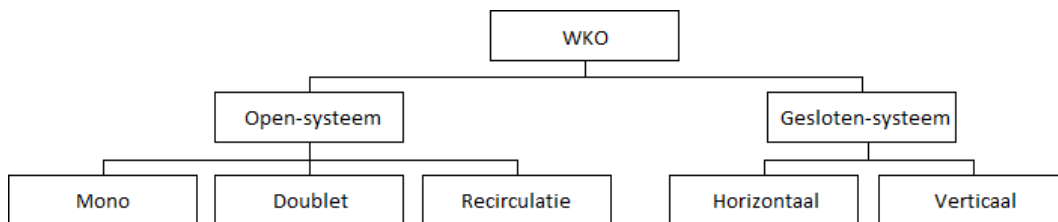
Gebouwen hebben verwarmings- en koelingsystemen nodig voor een comfortabel binnenklimaat. Veelal worden hiervoor conventionele systemen gebruikt op basis van fossiele brandstoffen. In Nederland wordt steeds meer op duurzame energie ingezet. Een veel belovende manier en bewezen techniek om duurzamer met energie om te gaan is ondergrondse energieopslag. Onder deze ondergrondse energieopslag valt WKO. Een WKO is een duurzaam energiesysteem, waarbij gebruik gemaakt wordt van de ondergrond.

In Figuur 1 is een doorsnede te zien van het principe van een WKO-systeem. De WKO geeft invulling aan de warmte en koude behoeftes van gebouwen. Het algemene principe van een WKO is dat er in de zomer warmte van het gebouw opgeslagen wordt in de bodem, die vervolgens in de winter weer gebruikt kan worden voor verwarming van het huis. Dit werkt ook andersom. In de winter wordt koude van het gebouw opgeslagen in de bodem, vervolgens wordt dit in de zomer gebruikt voor verkoeling van het gebouw. Deze cyclus begint elk jaar opnieuw. De bodem wordt daarmee gebruikt om warmte en koude op te slaan. Om de warmte van de bodem en het gebouw uit te wisselen wordt er een warmtewisselaar toegepast. De warmte die onttrokken wordt is niet direct geschikt voor verwarming of koeling van het gebouw, omdat er nog sprake is van een laagwaardige temperatuur. Een warmtepomp staat tussen het gebouw en de WKO en maakt er de gewenste temperatuur van.



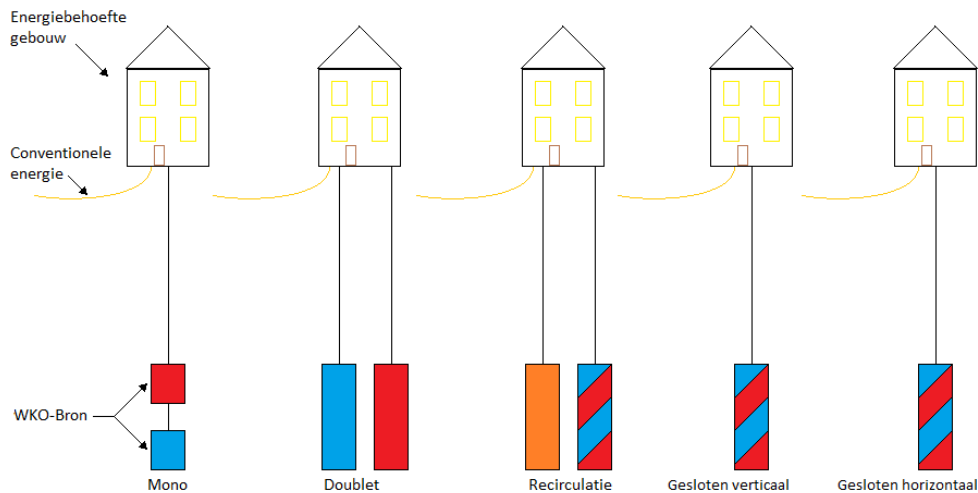
Figuur 1: Principe van een WKO-systeem (links) met de verschillende onderdelen (midden en rechts)

WKO-systemen zijn onder te verdelen in open en gesloten systemen. Beide systemen zijn weer opgedeeld in verschillende varianten (Figuur 2). Alle verschillende systemen uit Figuur 2 worden in dit hoofdstuk verder toegelicht. Bij elk type wordt omschreven wanneer ze goed functioneren en wat de globale besparing is t.o.v. van een conventioneel verwarmingssysteem. Verder wordt er per variant gekeken bij welke sector/functie ze voornamelijk worden toegepast. Elke variant heeft namelijk zijn eigen voor- en nadelen ten opzichte van de andere varianten.



Figuur 2: Overzicht van verschillende type WKO-systemen

Figuur 3 geeft een overzicht van verschillende individuele WKO-systemen gecombineerd met conventionele energievoorziening. Deze verschillende WKO-systemen worden hierna besproken (deelvraag 1).



Figuur 3: Overzicht van individuele WKO-systemen gecombineerd met conventionele energie

Toelichting: rood = warmtebron, blauw = koude bron, oranje = natuurlijke bodemtemperatuur.

2.3 Open WKO-systemen

In deze paragraaf wordt het open WKO-systeem beschreven. Eerst wordt ingegaan op de werking van een open WKO-systeem en vervolgens op de verschillende soorten die daarin te onderscheiden zijn.

2.3.1 Principes van het open WKO-systeem

Een open WKO-systeem gebruikt grondwater uit een watervoerende zandlaag, ook wel “aquifer” genoemd (zie paragraaf 2.5.1), voor de verwarming en verkoeling van gebouwen. In de zomer wordt de warmte van een gebouw (ca. 20°C) via een warmtewisselaar afgegeven aan het grondwater en via filters geïnjecteerd in de aquifer. Dit vormt een warmte bel (ca. 15°C) in de aquifer. De temperatuur in de warmte bel is altijd wat lager dan de temperatuur van het gebouw. Oorzaak van deze temperatuurdaling is dat er warmteverlies optreedt tijdens de warmteoverdracht in de warmtewisselaar. In de winter wordt het warme grondwater via de filters opgepompt en gebruikt om het gebouw te verwarmen. De warmte van het grondwater wordt via een warmtewisselaar (zie paragraaf 2.5.5) en een warmtepomp (zie paragraaf 2.5.6) afgegeven aan het gebouw. Bij deze warmte-wisseling koelt het grondwater weer af en wordt het teruggebracht in de grond. Dit vormt een koude bel (ca. 8°C) die het volgende seizoen weer gebruikt kan worden voor verkoeling van het gebouw. De warmte en koude bellen blijven rond het filter van de bron liggen. De grootte van de bellen verandert per seizoen. Bij een open WKO-systeem is er meestal een warmte en een koude bel, alleen bij een recirculatiesysteem zit het iets anders (Provincie Drenthe, 2016). Dit wordt in paragraaf 2.3.2.3 verder toegelicht.

Open systemen werken volgens een bepaald natuurkundig principe. De hoeveelheid toegevoegde warmte aan het gebouw of warmtepomp ligt aan de hoeveelheid onttrokken water uit de bodem, de warmtecapaciteit van het water en het temperatuurverschil tussen de onttrekkings- en injectietemperatuur (ΔT). Het natuurkundig principe hierbij is conform de formule:

$$Q = V \times C \times \Delta T$$

Q = De geleverde warmte of koude aan het gebouw (kWh)

V = Onttrokken water (m^3)

$\Delta T = T_o - T_i$ = Onttrekkingstemperatuur – injectietemperatuur (K)

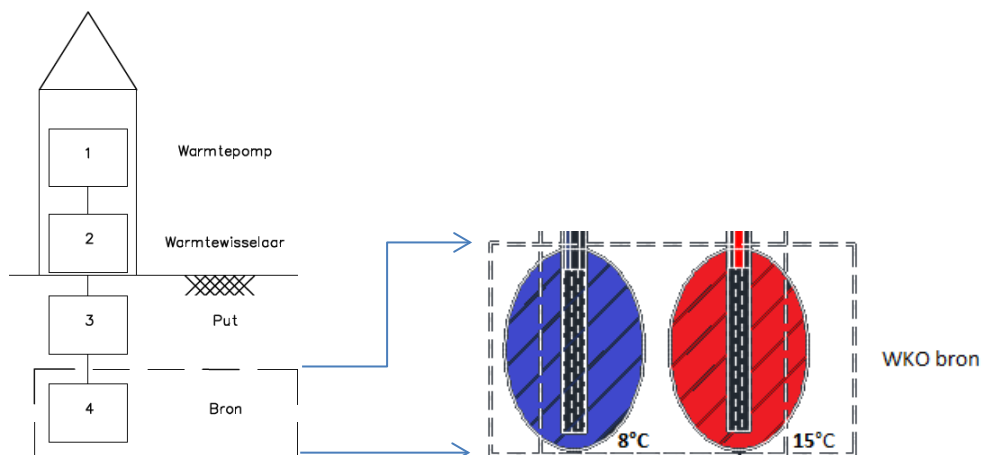
C = Warmtecapaciteit grondwater (1.167×10^{-3} kWh/ $m^3 \cdot K$)

Hoe groter de ΔT is hoe meer warmte of koude er geleverd wordt.

Een standaard open WKO-systeem bestaat uit de volgende onderdelen: onttrekkingsfilter, infiltratiefilter, waterpomp, warmtewisselaar, leidingen en kleppen, warmtepomp, meet en regelsysteem en een afgiftesysteem (Ecensy, 2017). Al deze onderdelen van een open WKO-systeem worden uitgelegd in paragraaf 2.5.

2.3.2 Varianten van het open WKO-systeem

Een open WKO-systeem kan onderverdeeld worden in drie varianten, monobron, doubletbron en recirculatiebron. Deze varianten worden in deze paragraaf verder toegelicht. Figuur 4 laat zien dat het in deze paragraaf om de bron van het WKO-systeem gaat. De verschillen in de drie varianten zitten in de bron.

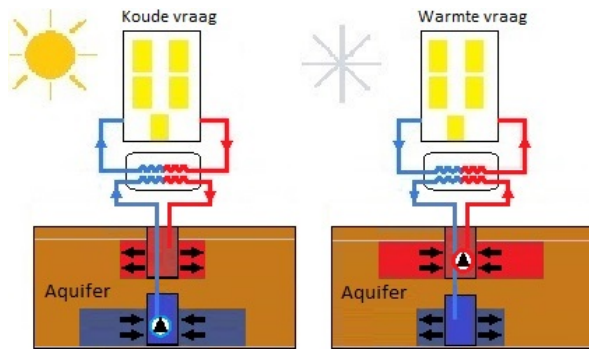


Figuur 4: Opbouw van een open WKO-systeem

Toelichting: Onder de bron vallen in deze paragraaf de mono-, doublet- en recirculatiesystemen. Rechts in de figuur is de bron uitvergroet met een voorbeeld van de bellen van een doubletsysteem.

2.3.2.1 Monobron

Een monobron bestaat uit één bron met twee filterdelen voor een warmte (rood) en koude (blauw) bel (Figuur 5).

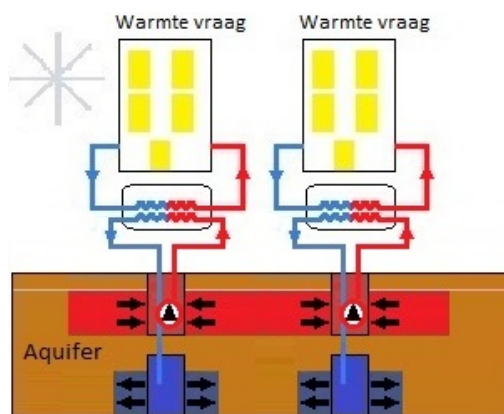


Figuur 5: Weergave van een mono-WKO-bron

Toelichting: situatie 's zomers (links) en 's winters (rechts).

De warmte en koude bel liggen boven elkaar, waarbij de warmte bel in de meeste gevallen zich boven de koude bel bevindt. Dit is omdat warmte de neiging heeft om te stijgen (of koude om te dalen). Hierdoor is de kans dat de bellen elkaar negatief gaan beïnvloeden kleiner. Het kan voorkomen dat de warmte bel onder ligt. Dit gebeurt wanneer er in de omgeving andere warmte bellen op de hoogte van de onderste bel van de monobron liggen. De koude bel wordt dan boven de warmte bel geplaatst om negatieve interferentie te voorkomen. Interferentie is de invloed van WKO-systemen op elkaar, waarbij ze elkaar kunnen verzwakken of versterken. Een verdere uitleg hiervan is te vinden in paragraaf 2.5.8.

Doordat de twee bellen boven elkaar liggen, is de monobron zeer gunstig voor een locatie met een beperkte ruimte in de ondergrond. Verschillende monobronnen kunnen eenvoudig naast elkaar geplaatst worden, omdat de warmte bellen van verschillende systemen zich op dezelfde hoogte bevinden. Dit zorgt ook nog eens voor een positieve interferentie van de bronbellen, aangezien de bellen rond dezelfde temperaturen fysiek met elkaar in contact komen (Figuur 6). De verticale afstand tussen warmte en koude bronfilter ligt meestal tussen de 5 en 30 meter (Bloemendal, et al., 2013).



Figuur 6: Twee individuele monobronnen met positieve interferentie

Een monobron kan niet altijd worden toegepast. Wanneer de dikte van de aquiferzone beperkt is, is er geen ruimte om de bellen boven elkaar te leggen. Vooral in Zuid- en Oost-Nederland is het lastig om een monobron te plaatsen. Hier is de aquifer te dun om twee bellen boven elkaar te kunnen plaatsen. In West-Nederland is er veel meer ruimte voor een monobron, omdat de hydrologische basis ongeveer 200 meter onder NAP ligt. Als een monobron niet toegepast kan worden, moet er een andere varianten van een WKO-systeem worden toegepast (Kennisnetwerk OBN, 2015).

Een monobron is vooral geschikt voor kleinschalige gebouwen die kleinere vermogens nodig hebben. Als er gekeken wordt naar gebouwen in Nederland worden ze vaak gebruikt voor 1.000 à 15.000 m² bruto vloeroppervlakte (BVO), mits de bodem geschikt is. Deze geschiktheid heeft te maken met diepte van de aquifer. De bovengrens van het debiet is ca. 70 m³/uur.

Besparing

De energiebesparing op koeling kan oplopen tot 50 – 80% ten opzichte conventionele systemen. Voor verwarming kan deze energiebesparing oplopen tot 30 – 50% ten opzichte van conventionele systemen. Het ligt aan omgevingsfactoren (zoals bodemopbouw) en beheer van het systeem hoe groot de besparing is (Agter, 2016).

Voordelen

Een monobron heeft de volgende voordelen:

- er is maar één boring nodig voor een mono-systeem
- verschillende systemen kunnen dicht naast elkaar geplaatst worden zonder enige negatieve interferentie
- Er is minder ruimtegebruik en er zijn minder kabels en leidingnetwerk nodig (hierdoor lager energieverlies).

Nadelen

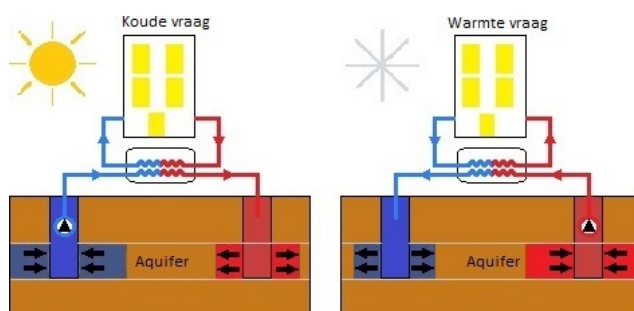
Een monobron heeft het volgende nadeel:

- de installatie is complex omdat er twee stromingsrichtingen nodig zijn
- De bodemopbouw moet toereikend zijn voor het plaatsen van twee bronfilters in hetzelfde watervoerende pakket, met andere woorden de aquifer moet dik genoeg zijn.

2.3.2.2 Doubletbronnen

Een doubletbron heeft dezelfde werking als een monobron. Een doubletbron bestaat echter uit twee boringen in plaats van één, waarbij de bronnen op dezelfde hoogte liggen in de ondergrond. De ene bron vormt een koude bel en de andere bron een warmtebel. Een doubletsysteem werkt in principe als een monosysteem, alleen liggen de bellen naast elkaar in plaats van boven elkaar (Provincie Drenthe, 2016).

Figuur 7 laat een schematische weergaven zien van een doublet WKO.



Figuur 7: Principe van een doublet WKO-bron

Toelichting: situatie 's zomers (links) en 's winters (rechts).

Om negatieve interferentie te voorkomen, liggen de warmte en koude bronnen van één WKO-systeem minimaal 50 à 100 meter uit elkaar. Doordat er bij een doubletbron twee bronnen aanwezig zijn, is er in doorsnede meer ondergrondse ruimte nodig dan bij een monobron. Het vermogen van een doublet is al snel groter dan dat van een monobron. Er zijn doubletsystemen die 300 m³/uur halen. Dit is wel het maximum van een doublet. Bij hogere gewenste capaciteit kunnen er extra doubletten bijgeplaatst worden. Deze capaciteit is alleen mogelijk als er veel ruimte is in de aquifer. De filters van de putten kunnen bij een doubletsysteem ook langer zijn door de extra ruimte (zie voor waterpompen en filters paragraaf 2.5.2) Hierdoor wordt er per put meer grondwater op- en afgenomen dan bij één boring van een monobron. Doubletten worden toegepast voor groter kantoren en complexen. Meestal bij een BVO van 20.000 m² of groter.

Besparing

De energiebesparing op koeling kan oplopen tot 50 – 80% ten opzichte conventionele systemen. Voor verwarming kan deze energiebesparing oplopen tot 30 – 50% ten opzichte van conventionele systemen. Het ligt aan omgevingsfactoren (zoals bodemopbouw) en beheer van het systeem hoe groot de besparing is. Verder is het besparingspercentage niet verschillend met dat van monobronnen. De grotere capaciteit wordt alleen gebruikt om een groter oppervlakte te koelen of verwarmen (Agter, 2016).

Voordeel

Een doubletbron heeft de volgende voordeel:

- Het heeft een grotere capaciteit dan mono en gesloten systemen en kan daardoor toegepast worden voor grote gebouwen (>20.000 m²).

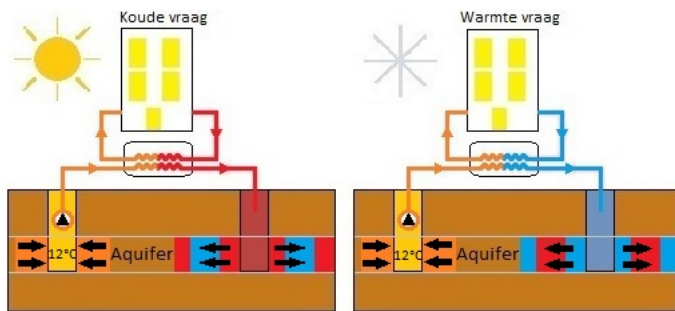
Nadelen

Een doubletbron heeft de volgende nadelen:

- de installatie is complex omdat er twee stromingsrichtingen nodig zijn
- Het bestaat uit meerdere putten in vergelijking met een monosysteem, waardoor er meer ondergrondse ruimte nodig is.

2.3.2.3 Recirculatiebronnen

De recirculatiebron is een eenvoudig WKO-systeem (zie Figuur 8). De recirculatiebron heeft integendeel tot een mono- of doubletbron maar één thermische bel, want bij een recirculatie is er alleen één onttrekkingsbron en één retourbron (thermische bel). Daarmee is er geen sprake van een koude en warmte bel zoals de mono- en doubletbron. Deze onttrekkingsbron en retourbron kunnen zowel naast elkaar als boven elkaar liggen. Uit de onttrekkingsbron wordt het grondwater onttrokken en wordt de temperatuur via een warmtewisselaar aan het gebouw afgegeven. Het grondwater dat onttrokken wordt heeft de natuurlijke temperatuur van de bodem dat rond de 11 – 12 °C ligt. Er wordt dus afwisselend warm ('s zomers) en koud grondwater ('s winters) bij de retourbron geïnfiltrerd. Dit zorgt ervoor dat er geen grote temperatuursverandering in de bodem zit. Voor een recirculatiesysteem moet de grondwaterstroomrichting zowel 's zomers als 's winters dezelfde kant op stromen (richting de onttrekkingsbron). Het geïnfiltrerde grondwater komt na enige tijd weer uit bij de onttrekkingsbron, waar het grondwater uiteindelijk weer een temperatuur van rond de 11 – 12 °C heeft (De Groene Energie Maatschappij, 2016).



Figuur 8: Principe van een Recirculatiesysteem

Toelichting: situatie 's zomers (links) en 's winters (rechts).

Omdat het grondwater dat gebruikt wordt een natuurlijke bodemtemperatuur heeft, moet het benodigde debiet bij een recirculatiesysteem groter zijn in vergelijking tot een mono- en doubletsysteem, om dezelfde energie uit de bodem te krijgen. Dit komt omdat de temperatuurverschillen het hele jaar door kleiner zijn dan die van een mono- en doubletsysteem. Een recirculatiesysteem kan toegepast worden tot een capaciteit van ca. 250 m³/uur en wordt met lagere capaciteiten al toegepast bij een BVO vanaf 2.000 m² (Wierikx, et al., 2009). Recirculatiesystemen worden niet veel toegepast in Nederland, omdat het temperatuurverschil kleiner is dan bij de andere systemen. Ze worden wel toegepast bij locaties met hoge grondwaterstromingssnelheid. Bij dit soort locaties is het moeilijk om de warmte en koude bellen stabiel te houden (Whenham, 2012).

Voordelen

Een recirculatiebron heeft de volgende voordelen:

- het thermische invloedgebied is niet groot, daardoor heeft het niet snel een negatieve invloed op andere WKO-systemen in de buurt
- Er is alleen sprake van één onttrekkingsbron en één infiltratiebron waardoor het systeem eenvoudiger is.

Nadelen

Een recirculatiebron heeft de volgende nadelen:

- de filters van een recirculatiesysteem raken sneller verstopt vergeleken met een mono- en doubletsysteem, omdat er constant één richting wordt gepompt
- een recirculatiesysteem heeft een kleinere ΔT dan bij een mono- en doubletbron. Hierdoor zal het benodigde debiet groter moeten zijn
- Er is een lagere coëfficiënt of performance van de warmtepomp (zie paragraaf 2.5.6) voor zowel verwarming als koeling dan bij een mono- en doubletsysteem, want de grondwatertemperatuur ligt niet boven of onder de natuurlijke bodemtemperatuur.

2.4 Gesloten WKO-systemen

In deze paragraaf wordt het gesloten WKO-systeem beschreven. Eerst wordt ingegaan op de werking van een gesloten WKO-systeem en vervolgens op de verschillende soorten die daarin te onderscheiden zijn.

2.4.1 Principes van het gesloten WKO-systeem

Gesloten WKO-systemen zijn bodemwarmtewisselaars die gebruik maken van de bodem voor de opslag van warmte en koude. In plaats van het onttrekken van grondwater, wat gebeurt in een open WKO-systeem, maakt een gesloten WKO-systeem gebruik van gesloten lussen in de ondergrond. Gesloten systemen maken gebruik van de lagere temperatuur van de bodem. Binnen de gesloten lussen wordt een mengsel van water en antivries gecirculeerd en dit staat niet fysiek in contact met grondwater. Er is wel een thermisch contact. Dit mengsel kan warmte of koude via geleiding uitwisselen met de ondergrond. In de zomer geeft het mengsel warmte af aan de ondergrond en neemt het koude op voor verkoeling van het gebouw. 's Winters is het precies andersom, dan geeft het mengsel koude af aan de ondergrond en neemt het warmte op voor verwarming van het gebouw. Doordat het gesloten lussen zijn die niet fysiek in contact staan met het grondwater koelt of warmt de omliggende bodem minder snel dan bij een open WKO-systeem. De warmte en koude, die onttrokken wordt uit de bodem, wordt via een warmtewisselaar naar het gebouw overgedragen en, als het nodig is, kan een warmtepomp de warmte opkrikken naar een gewenste temperatuur (Provincie Drenthe, 2016).

Een gesloten systeem kan minder koude en warmte onttrekken dan een open systeem. Bij een gesloten systeem is er verlies van warmte omdat de warmte via de lus moet worden overgedragen (overdrachtsfactor). Een gesloten systeem geeft aan het begin van de zomer meer koeling, maar aan het einde van de zomer minder koeling. Doordat de warmte van een gebouw in de bodem gestopt wordt, wordt de bodem warmer en kan het steeds minder warmte van het gebouw opnemen. Aan het begin zal de bodemtemperatuur laag zijn, zo rond de 8°C. Naarmate de zomer verloopt loopt de bodemtemperatuur al snel op naar 15°C à 20°C (den Dekker, 2017).

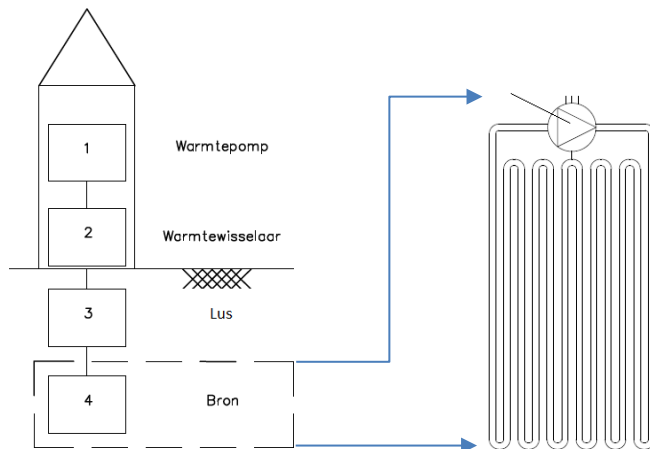
Gesloten WKO-systemen kunnen van een diepte van enkele meters tot meer dan honderd meter reiken. Gesloten WKO-systemen zijn perfect geschikt voor individuele woningen en kleine kantoorpanden, omdat ze makkelijk aan te leggen en relatief goedkoop zijn. Gesloten systemen worden toegepast tot een BVO van 5.000 m² (Energie Platform regio Alkmaar, 2017).

Gesloten WKO-systeem kunnen onderverdeeld worden in verticale WKO en horizontale WKO. Een gesloten WKO-systeem bestaat in principe uit de volgende onderdelen: gesloten lussen, circulatiepomp, warmtewisselaar, warmtepomp, meet en regelsysteem en een afgiftesysteem. Al deze onderdelen van een gesloten systeem worden uitgelegd in paragraaf 2.5 (Ecensy, 2017).

2.4.2 Varianten van het gesloten WKO-systeem

Bij gesloten systemen wordt onderscheid gemaakt tussen verticale, diepe variant én een horizontale, ondiepe variant. Deze varianten worden in deze paragraaf verder toegelicht. Figuur 9 laat zien dat

het in deze paragraaf om de bron van het WKO-systeem gaat. De verschillen in de twee varianten zitten in de bron.



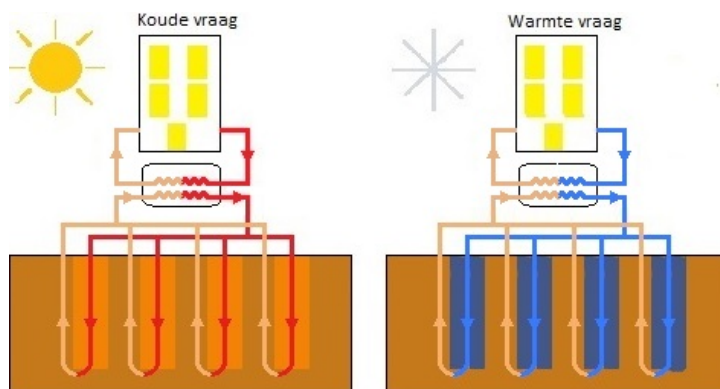
Figuur 9: Opbouw van een gesloten WKO-systeem

Toelichting: Onder de bron vallen in deze paragraaf de verticale en horizontale WKO-systemen. Rechts in de figuur is de bron uitvergroot met een voorbeeld van verticale of horizontale lussen.

2.4.2.1 Verticale WKO-systemen

Bij een verticale gesloten WKO-systeem worden er verticaal lussen tot maximaal 150 m de diepte ingebracht. Verticale WKO-systemen worden voornamelijk toegepast bij woningen, omdat de totaal benodigde capaciteit voor een gemiddelde woning lager is dan voor een groot kantoorpand. Als er meer capaciteit gewenst is, zullen er meer verticale lussen aangebracht moeten worden, zodat er een groter oppervlakte in de bodem verwarmd wordt (Provincie Drenthe, 2016).

Figuur 10 geeft het principe weer van een verticale gesloten WKO-systeem in een zomer- en een wintersituatie.



Figuur 10: Principe verticale WKO-systemen

Toelichting: situatie 's zomers (links) en 's winters (rechts).

Besparing

De energiebesparing op koeling en verwarming kan oplopen tot 30 – 50% ten opzichte van conventionele systemen. Het ligt aan omgevingsfactoren (zoals bodemopbouw) en monitoring van het systeem hoe groot de besparing is (Agter, 2016)

Voordeel

Een verticaal WKO-systeem heeft de volgende voordelen:

- gunstig voor individuele woningen, omdat bij open systemen de benodigde capaciteit al snel te groot is (goedkoper voor privégebruikers)
- er is weinig oppervlakte nodig (het past op een perceel van een woning)
- Het kan gerealiseerd worden vanaf enkele meters diepte.

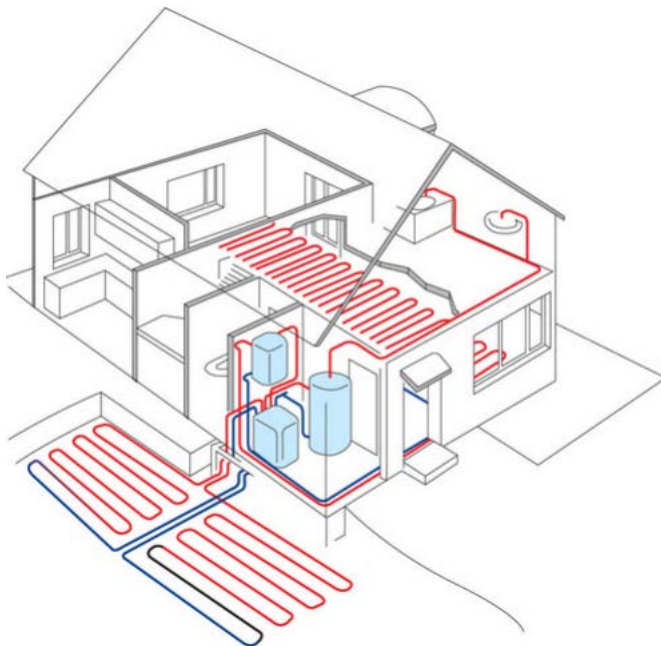
Nadeel

Een verticaal WKO-systeem heeft de volgende nadelen:

- voor een grote capaciteit zijn er veel lussen nodig om voldoende warmte en koude te kunnen leveren
- Een gesloten systeem kan minder koude en warmte onttrekken dan een open systeem.

2.4.2.2 Horizontale WKO-systemen

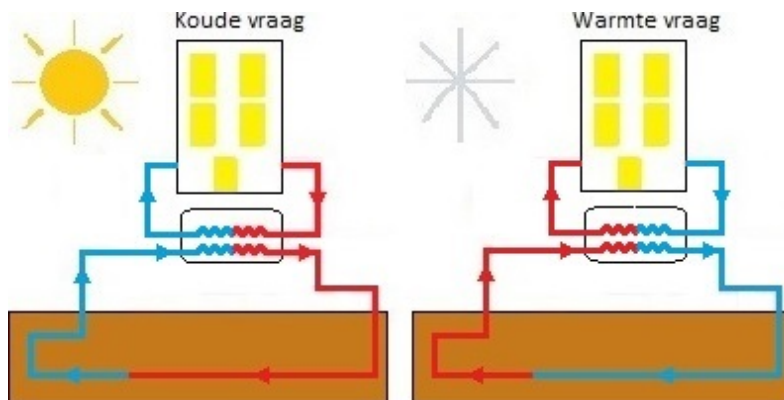
Horizontale gesloten WKO-systemen werken hetzelfde als verticale gesloten WKO-systemen, alleen de positionering in de bodem is anders, deze loopt via sleuven (Figuur 11). Er hoeven geen boringen gemaakt worden, dit is een voordeel. De lussen worden op ongeveer één tot twee meter onder het maaiveld horizontaal neergelegd. Hier zit qua aanleg een groot verschil ten opzichte van een verticale WKO-systeem.



Figuur 11: Schematisch weergave horizontaal WKO-systeem

Bron: (Cremers, 2013)

Het principe van een horizontaal WKO-systeem, in de zomer- en wintersituatie, is weergegeven in Figuur 12.



Figuur 12: Principe horizontale WKO-systemen

Toelichting: situatie 's zomers (links) en 's winters (rechts).

Bij een verticaal WKO-systeem kan er, afhankelijk van de bodemsamenstelling en het grondwaterpeil, 20 tot 50 W/m (diepte) onttrokken worden. Bij een horizontaal systeem kan er tussen de 20 - 30 W/m² (oppervlakte) onttrokken worden (Cremers, 2013). Het oppervlakte van een horizontaal WKO-systeem moet circa drie keer zo groot zijn dan het totaal te verwarmen oppervlak. Dit heeft als nadeel dat het veel ondergrondse ruimte in beslag neemt en die is in de meeste gevallen niet aanwezig. Horizontale WKO-systemen worden dan ook niet veel toegepast in Nederland (Provincie Drenthe, 2016).

Bij een horizontaal WKO-systeem zijn wel de temperatuurverschillen in de ondiepe bodem van invloed.

Besparing

De energiebesparing op koeling en verwarming kan oplopen tot 30 – 50% ten opzichte van conventionele systemen. Het ligt aan omgevingsfactoren (zoals bodemopbouw) en monitoring van het systeem hoe groot de besparing is (Agter, 2016)

Voordelen

Een horizontaal WKO-systeem heeft de volgende voordelen:

- het is gunstig voor woningen omdat het een eenvoudig aan te leggen systeem is
- er hoeven geen boringen te worden gedaan, omdat de aanleg via sleuven in de grond geschiedt
- Het is onderhoudsvriendelijk.

Nadelen

Een horizontaal WKO-systeem heeft de volgende nadelen:

- neemt veel ruimte in beslag vlak onder het maaiveld
- Een gesloten systeem kan minder koude en warmte onttrekken dan een open WKO-systeem, doordat de ΔT aan eind aan het seizoen lager is.

2.5 WKO-systeem: onttrekkingsgebied, systeemonderdelen en thermische balans

Een WKO systeem ligt in een onttrekkingsgebied. De kenmerken hiervan worden in 2.5.1 behandeld. Een WKO-systeem zelf bestaat uit diverse onderdelen. De verschillende onderdelen of onderwerpen van een WKO-systeem worden de paragrafen 2.5.2. tot en met 2.5.7. toegelicht. Het hoeft niet per sé zo te zijn dat alle onderdelen die hier besproken worden in elk WKO-systeem voorkomen, dit wordt daarbij aangegeven. Tot slot komt in paragraaf 2.5.8 de thermische balans en thermische invloeden die relevant zijn voor de werking van WKO-systemen aan bod.

2.5.1 Onttrekkingsgebied (open systemen)

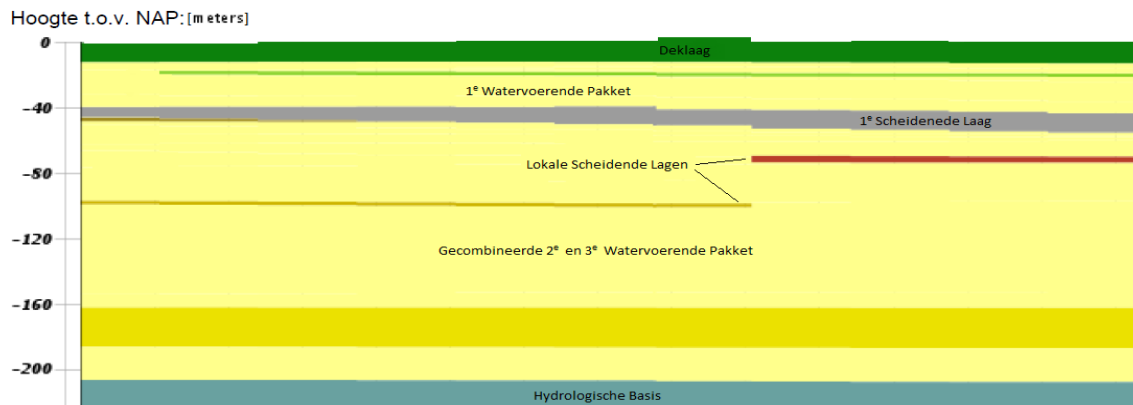
Een WKO-systeem ligt in een onttrekkingsgebied. Dit gebied is van invloed op de werking van het WKO-systeem. De bronnen van open WKO-systemen moeten op een bepaalde diepte liggen om grondwater te kunnen onttrekken uit de aquiferzone (watervoerende pakket), zie Figuur 13. Voor de diepte van de onttrekking zijn geen wettelijke of gemeentelijke voorschriften, de jaarlijkse onttrekking van grondwater (vergunde capaciteit) is wel afgebakend tot een maximum. Dit laatste omdat er een grens is aan de hoeveelheid water die onttrokken mag worden.

Voor Amsterdam (waar de variantenstudie in hoofdstuk 5 op is gericht) ligt de aquifer gemiddeld tussen de 50 en 180 meter onder het maaiveld. Het vermogen van de pomp (zie paragraaf 2.5.2) wordt ontworpen aan de hand van de vermogensvraag van het gebouw. Woningen gebruiken gemiddeld minder dan 10 m³/uur aan grondwater. Voor bedrijven is deze vraag groter dan bij woningen. Het ligt veelal tussen de 50 en 100 m³/uur. Voor grote gebouwen kan het zelfs oplopen tot 250 - 300 m³/uur. Het gebruik van de benodigde hoeveelheid grondwater wordt mede bepaald door de ΔT van het WKO-systeem en de vraag van het gebouw.

Figuur 13 laat een doorsnede van een bodemopbouw in Amsterdam zien. De bodemopbouw kan geschematiseerd worden in een aantal watervoerende pakketten, scheidingslagen en een deklaag. De scheidingslagen en deklaag bestaan meestal uit klei, slib en veenlagen die slecht waterdoorlatend zijn. Het kost in deze lagen meer vermogen om het grondwater te onttrekken. De lagen zijn wat compacter dan de watervoerende pakketten die voornamelijk uit zand en grind bestaan. Deze pakketten zijn een goede waterdoorlatende laag. Het grondwater stroomt hier makkelijker doorheen. De meeste filters van de putten (zie paragraaf 2.5.2) worden dan ook in dit watervoerende pakket geplaatst.

De hydrologische basis is de grens die slecht grondwater doorlaat. De laag bestaat uit vroeg pleistocene kleiige afzetting. Deze hydrologische laag komt van Oost-Nederland naar West-Nederland steeds dieper te liggen. In Oost-Nederland ligt deze dichtbij het maaiveld (Kennisnetwerk OBN, 2015).

De gegevens van een bodemopbouw komen uit REGIS (Regionaal Geohydrologisch Informatie Systeem). Deze doorsnedes zijn gebaseerd op booronderzoeken in de omgeving. De meeste boringen gaan tot een diepte van ongeveer 20 - 30 meter, andere enkele tot ongeveer 150 meter diep. Het is mogelijk dat de bodemgegevens van REGIS in de praktijk afwijken omdat de ruimte tussen de booronderzoeken wiskundig geïnterpreteerd worden (TNO, 2017).

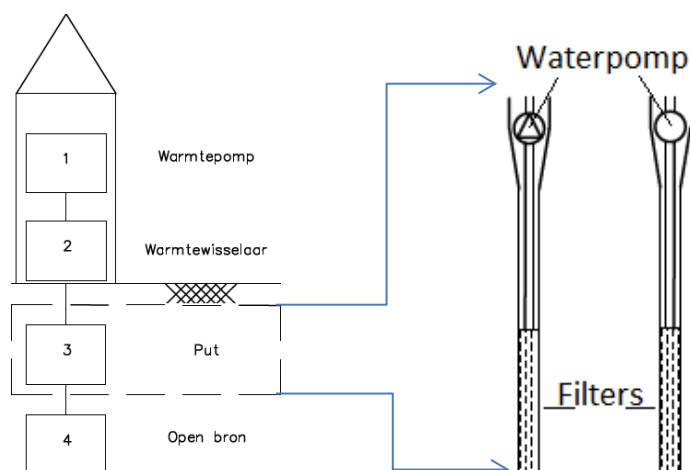


Figuur 13: Doorsnede van een ondergrond met aquiferzones

Toelichting: In de aquiferzone (watervoerende pakket) kan het grondwater onttrokken worden.
 Bron: (TNO, 2017)

2.5.2 Waterpompen en filters (open systemen)

Om de opgeslagen warmte in het gebouw te krijgen is in een open WKO-systeem een pomp met filters nodig. De bron van de WKO put (Figuur 14) is het grondwater.



Figuur 14: Waterpompen en filters in open WKO-systemen

Toelichting: Links geeft aan waar de waterpompen en filters in een open WKO-systemen bij horen, rechts een schematische tekening van de twee onderdelen in een doubletsysteem.

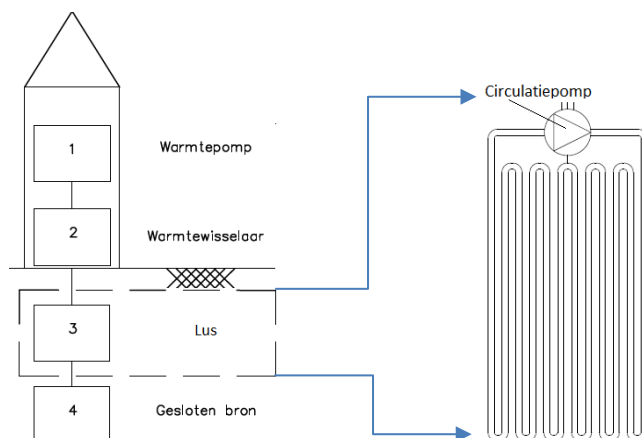
De waterpomp zorgt ervoor dat het grondwater via de filters uit de aquifer onttrokken kan worden. Het grondwater uit de aquifer heeft van nature de neiging te stijgen tot een paar meter onder het maaiveld. De stijging komt door de atmosferische druk, die lager is dan de druk van het grondwater in de bodem. Door deze stijging van het grondwater hoeft de waterpomp niet op filterhoogte geplaatst te worden, maar kan deze ongeveer 10 meter onder het maaiveld komen. Voor een goede werking van de waterpomp moet deze wel in het grondwater hangen, zodat er geen lucht wordt gepompt. Vandaar dat de pomp niet bovengronds staat.

Voor een open WKO-systeem zijn er altijd twee pompen aanwezig, die zowel kunnen onttrekken als infiltreren. Deze heten een wateronttrekkingspomp respectievelijk een infiltratiepomp. Voor de mono en doublet wisselen de twee pompen zich af. Bij een recirculatie heeft de ene pomp altijd een

onttrekkingsfunctie en de andere een infiltratiefunctie. Bij het onttrekken van grondwater, met behulp van de waterpomp, daalt de grondwaterstand een paar meter bij de onttrekkingsbron. De waterpomp pompt het grondwater naar het gebouw, waarna het vervolgens weer geïnjecteerd wordt in de andere infiltratiebron. Via filters komt het grondwater weer in een bel terecht. Door deze infiltratie stijgt het grondwater bij deze bron.

2.5.3 Circulatiepompen (gesloten systemen)

Een circulatiepomp (Figuur 15) wordt toegepast bij gesloten systeem. Deze zorgt ervoor dat het water met antivriesmiddel in de lussen rond wordt gepompt en dus zo warmte van de omgeving opneemt en aan de warmtewisselaar van het gebouw afstaat.



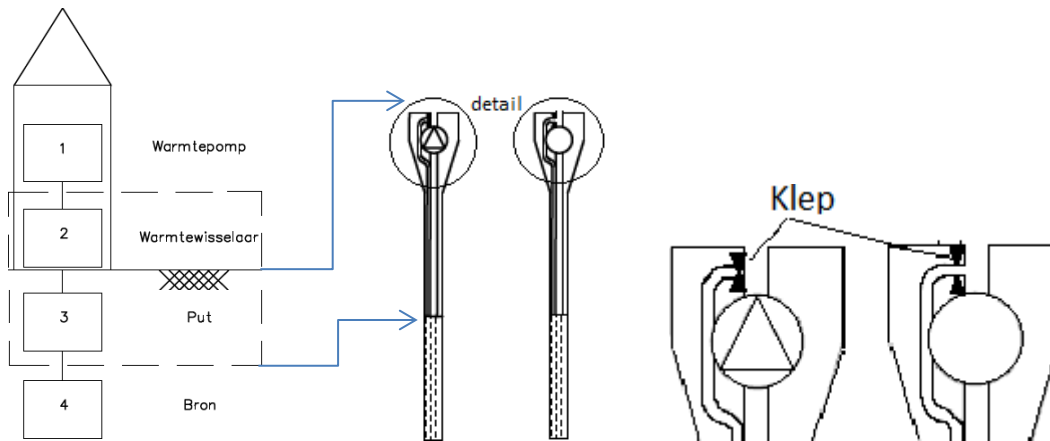
Figuur 15: Circulatiepompen in een gesloten WKO-systeem

Toelichting: Links geeft aan waar de circulatiepomp zich bevindt in een gesloten WKO-systeem, rechts schematische tekening van een circulatiepomp in een verticale WKO-systeem.

2.5.4 Leidingen en kleppen

Een leiding transporteert water (in een gesloten systeem met antivries) in het WKO-systeem. Dit water geeft de energie af of neemt de energie op. Het type leiding en de lengte van de leiding hebben invloed op de temperatuur van het water in de leiding. De temperatuurdaling ontstaat onder andere door omgevingstemperaturen. De kleppen dienen om een put open of dicht te zetten. Bij een systeem met meerdere bronnen is het regelen van de kleppen zeer belangrijk. Deze bepalen hoeveel water er naar het distributienet of gebouw kan toestromen.

Figuur 16 laat zien dat er kleppen open en dicht kunnen staan in de WKO-put. Wanneer de kleppen open staan wordt er geïnfiltriseerd (rechts) en wanneer ze gesloten zijn wordt er onttrokken (links).

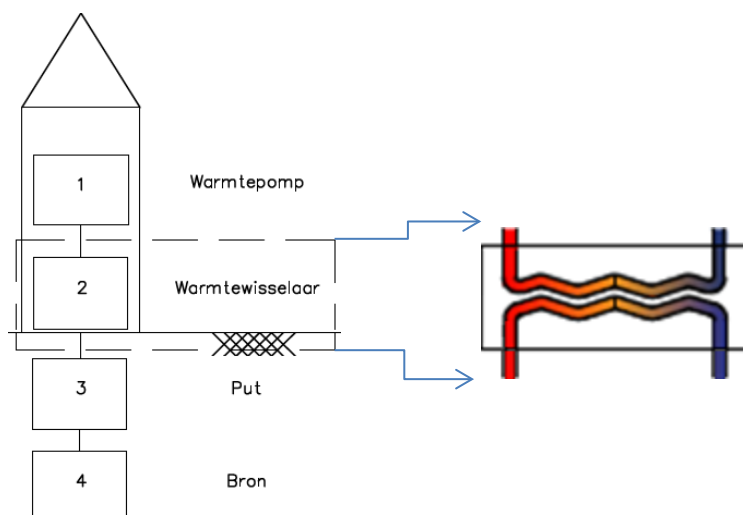


Figuur 16: Leidingen en kleppen

Toelichting: De kleppen en leidingen van WKO-systemen bevinden zich in de putten en warmtewisselaars, rechts een schematische tekening van kleppen in WKO-putten.

2.5.5 Warmtewisselaar

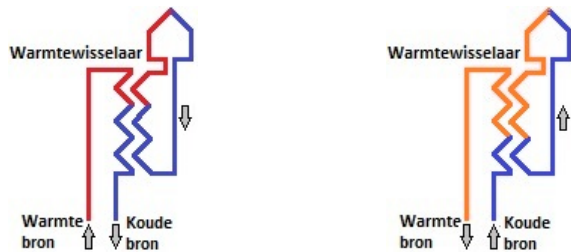
Tussen de WKO put en de warmtepomp staat een warmtewisselaar (Figuur 17).



Figuur 17: De warmtewisselaar

De warmtewisselaar heeft als functie de warmte van een vloeistof over te brengen naar een andere vloeistof (Figuur 18) en de vloeistoffen van elkaar gescheiden te houden. De warmtewisselaar in een WKO-systeem bevindt zich in pandig. Bij een warmtewisselaar wordt de warmte van de bron uitgewisseld met de warmte van het gebouw.

Daarnaast is er sprake van scheiding van vloeistoffen. Bij *gesloten* systeem moet er een scheiding zitten tussen het afgifte systeem en de lussen omdat er in deze lussen een antivriesmiddel zit. Het afgiftesysteem is niet gevuld met dit antivriesmiddel, maar met gewoon water. Bij *open* systemen zorgt de warmtewisselaar ervoor dat het grondwater niet direct in het gebouw komt, omdat het soms heel ijzerhoudend en zout water kan zijn. Dit betekent dat het erg agressief voor het binnenklimaatstelsel kan zijn. Het grondwater mag ook niet met lucht in aanraking komen, omdat het een anaerobe proces moet blijven. In het grondwater zitten ijzerionen en wanneer deze reageren met zuurstof (lucht) gaan leidingen roesten (den Dekker, 2017).

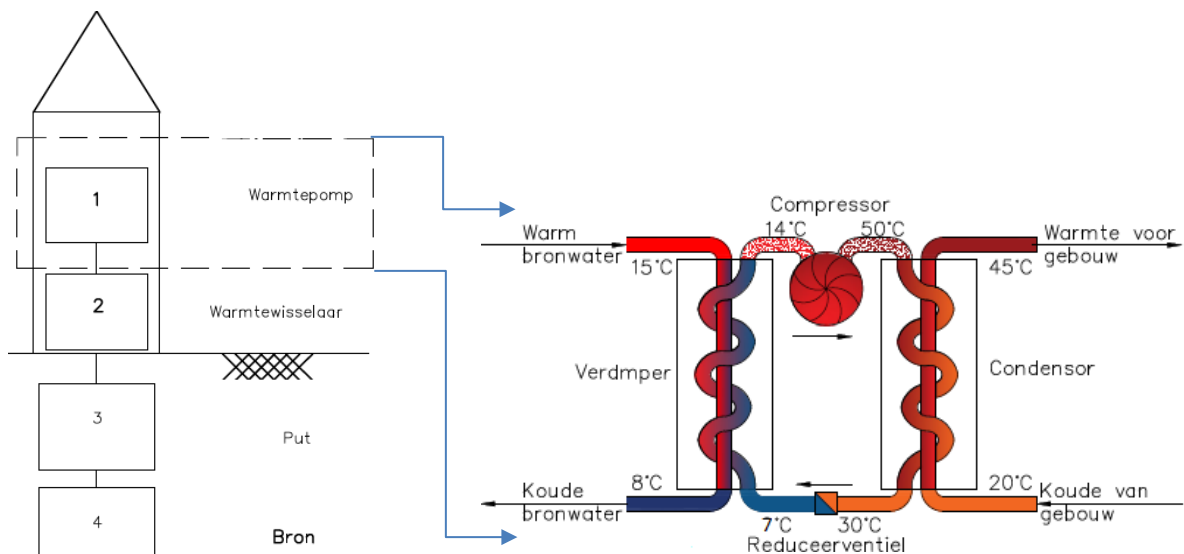


Figuur 18: Principe warmtewisselaar

Toelichting: situatie 's winters (links) en 's zomers (rechts).

2.5.6 Warmtepomp

Na de warmtewisselaar is de temperatuur nog te laag om te gebruiken voor verwarming in gebouwen. Om het ruimteverwarmingswater te verwarmen wordt er vaak gebruik gemaakt van een warmtepomp. Een warmtepomp zet laagwaardige temperaturen (12 – 20°C) die het grondwater heeft afgegeven om in hoogwaardige temperaturen (40 – 70°C) voor het binnenklimaat. Deze warmteoverdracht gebeurt via een koudemiddel. Dit koudemiddel neemt die warmte op en staat deze weer af. In Figuur 19 is het werkingsprincipe van een warmtepomp te zien.



Figuur 19: Werkingsprincipe warmtepomp

Toelichting: situaties winters (rechts uitvergroet).

Een warmtepomp bestaat uit vier hoofdcomponenten, namelijk de verdamper, de compressor, de condensor en het reduceerventiel. In de verdamper stromen bronwater en het koudemiddel door gescheiden leidingen. Het bronwater (ca. 15°C) geeft zijn warmte af aan het koudemiddel (6°C) dat door de verdamper stroomt. Het koudemiddel heeft een laag kookpunt en verandert van vloeistof naar damp (12°C). Hierna wordt het dampvormige koudemiddel door de compressor geleid en samengeperst, waardoor het een hogedruk en temperatuur (ca. 50°C) krijgt. De compressor heeft hiervoor elektrische energie nodig.

Het kookpunt van het koudemiddel ligt nu hoger dan in eerste instantie door de hoge druk. Hierdoor condenseert het bij een hoge temperatuur. Het condenseren van het koudemiddel gebeurt bij de

condensor. Hier geeft het koudemiddel haar warmte af aan het koude huiswater (ca. 20°C) dat door de condensor stroomt. Met dit verwarmde water (ca. 40°C) wordt het gebouw verwarmd. Door de warmteoverdracht is de damp weer overgegaan naar een vloeistof. De vloeistof (30°C) van het koudemiddel wordt verder gepompt naar het reduceerventiel waar de druk van het koudemiddel omlaag wordt gehaald. Uiteindelijk komt het koudemiddel met een temperatuur van ca. 6°C weer in de verdamper terecht en begint de cyclus weer opnieuw.

In de zomer werkt de warmtepomp precies hetzelfde alleen dan (als het nodig is) voor verkoeling van het gebouw. Alleen is de compressor dan niet in werking. Er komt koud grondwater binnen en deze wordt overgedragen naar het gebouw. Dit zou ook via een warmtewisselaar kunnen (Warmtepomplein, 2017).

Elke warmtepomp heeft een rendement. Een warmtepomp kan al snel drie tot vier keer rendement creëren met de energie die er in wordt gestoken. Dit rendement wordt uitgedrukt in een COP- (Coefficient Of Performance). De COP is een fabriekswaarde, dit is het rendement van de warmtepomp die vast wordt gesteld onder standaard omstandigheden. De waarde geeft aan hoeveel energie de compressor verbruikt en hoeveel nuttige warmte er geleverd wordt. Hoe hoger deze waarde is hoe efficiënter de warmtepomp. Wanneer een warmtepomp een COP van bijvoorbeeld 4 heeft, komt er 75% warmte uit de WKO-bron (3) en moet er nog 25% energie toegevoegd worden aan de warmtepomp (1). In Bijlage 2.1 Uitleg berekeningen (1. Warmtepomp formule) wordt er toegelicht hoe het berekenen van een COP werkt.

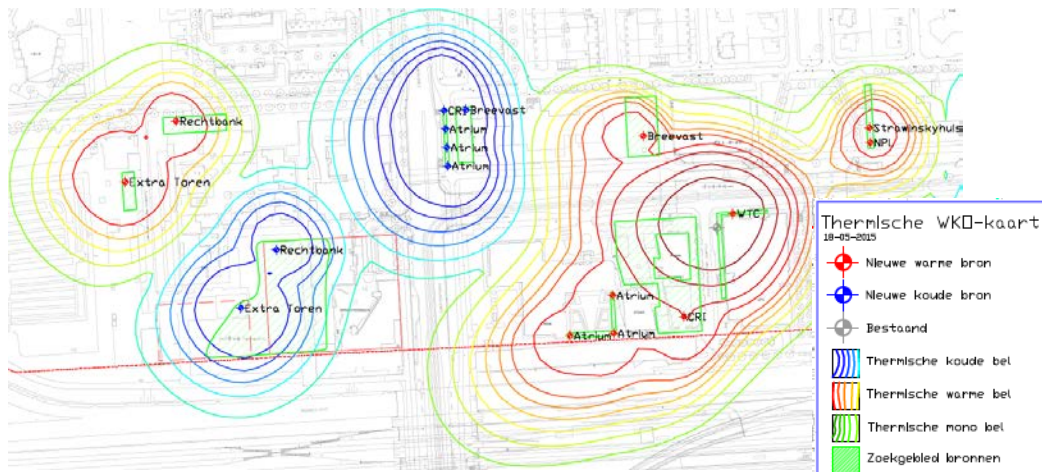
De SPF-waarde (seizoenprestatiefactor) is het rendement van de warmtepomp plus het afgiftesysteem van het gebouw die in de praktijk voorkomt. Het geeft het gemiddelde rendement over één seizoen weer. De SPF waarde ligt meestal lager omdat er bij deze waarde rekening gehouden wordt met thermische, elektrische en mechanische verliezen (Bouwmeester, 2013).

2.5.7 Meet- en regelsysteem

Om een WKO-systeem goed te kunnen besturen is er een meet- en regelsysteem aanwezig. Deze dient voor de werking van een WKO-installatie. Het houdt bij met welk debiet er wordt gepompt, wat de temperaturen van de warmte en koude bronnen zijn en wat de capaciteit van het WKO-systeem is. Verder bepaalt het wanneer de stroomrichting van het pompen omgedraaid moet worden en het pompvermogen. Met het meet- en regelsysteem kan er ook gecontroleerd worden of het WKO-systeem goed functioneert.

2.5.8 Thermisch balans en interferentie

Een WKO functioneert goed als er een goede thermische balans tussen de warmte en koude bronnen is. Wanneer de warmtevraag van het gebouw te hoog is voor de capaciteit van de bron, zal de bron uiteindelijk (tijdelijk) uitgeput raken. Om de bron weer te corrigeren van onbalans kan er verwarmd en gekoeld worden met conventionele systemen, zoals ketels en koelmachines. De warmte en koude die hierbij vrijkomt kan extra in de bodem ingebracht worden. Er moet voor een thermisch balans even veel warmte als koude in de bodem worden gebracht. Een thermische onbalans ontstaat bijvoorbeeld door sterke verschillen in de energievraag of de aanvoer- en retourtemperaturen van de bron. Het is dus zeer belangrijk dat een WKO goed in balans is om het duurzame energie rendement zo hoog mogelijk te houden.

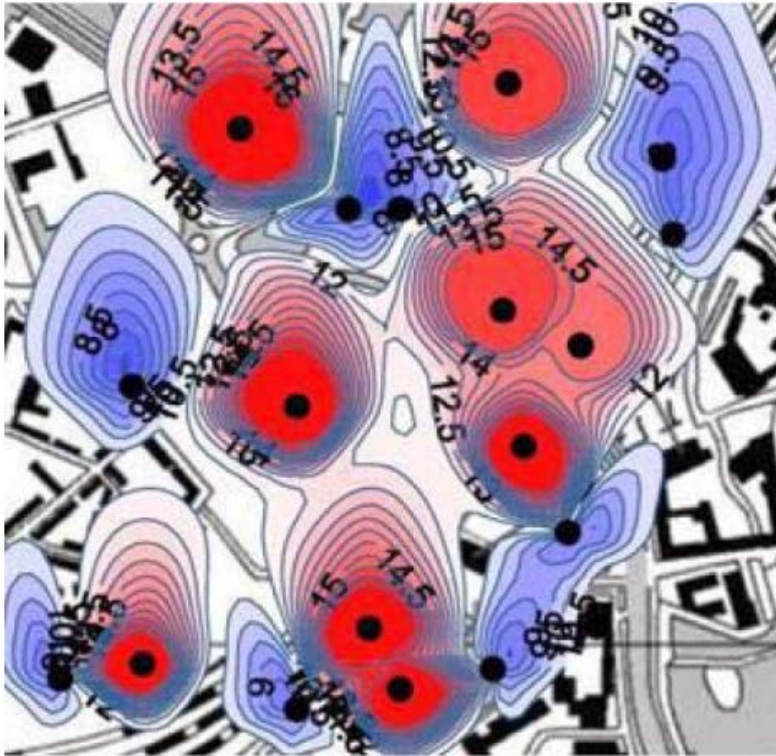


Figuur 20: Bovenaanzicht van thermische bellen, voorbeeld Zuidas Amsterdam

Bron: (Zuidas, 2015)

In de Figuur 20 is te zien hoe warmte en koude bellen verspreid zijn in een gebied. Om een goede thermisch balans in het gebied te krijgen zullen koude OF warmte bronnen zoveel mogelijk bij elkaar moeten liggen. Begin zomer zullen de koude bellen groot zijn en naarmate de winter dichterbij komt worden ze kleiner. De warmte bellen zullen in het zomerseizoen groeien en voor het winterseizoen gebruikt worden. Zo houden de bronnen elkaar in balans.

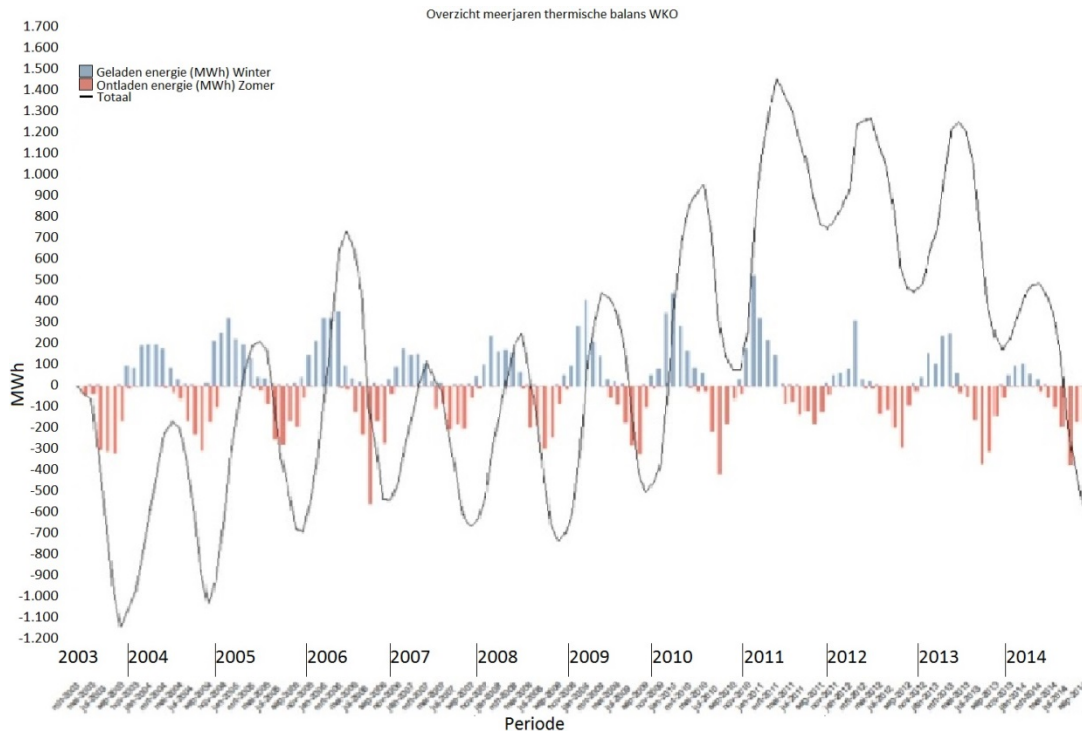
WKO-systemen kunnen elkaar beïnvloeden. Deze invloed wordt interferentie genoemd. Interferentie kan zowel positief (versterken) als negatief (verzwakken) zijn, wanneer open en/of gesloten WKO-systemen dicht bij elkaar liggen. Wanneer warmte met koude bellen overlappen is er sprake van negatieve interferentie (Figuur 21), doordat er zones ontstaan van bellen met verschillende temperaturen. Er treedt hierdoor rendementsverlies op. Als de warmte of koude bellen van de WKO-systemen in elkaar overlopen ontstaat er een positieve interferentie (Figuur 20), waardoor het rendement van het systeem juist groter wordt. De omvang van het interferentiegebied hangt af van het vermogen van de WKO-systemen (Arcadis, 2011). Met positieve interferentie kunnen systemen ook thermisch met elkaar verbonden worden. Dan gebruiken WKO-systemen elkaars bellen om zo gezamenlijk een goede energiebalans per systeem te krijgen. Energie kan zo onderling uitgewisseld worden.



Figuur 21: Negatieve interferentie

Toelichting: rood = warmte bel, blauw = koude bel, getallen geven temperaturen weer (met temperatuurlijnen).
Bron: (Arcadis, 2011)

Figuur 22 laat van de periode 2003 tot 2014 zien hoe de thermische balans van een WKO-systeem in Breda verloopt. De blauwe balken is hier de energie (MWh) van het afgekoelde water in de winter. Vaktechnisch wordt dit "koude-laden" genoemd, omdat er altijd vanuit de koude-bron wordt geredeneerd. De rode balken geeft de energie (MWh) van het opgewarmde water dat 's zomers geïnjecteerd is in de warmte bron weer. Men noemt die "koude-ontladen". De zwarte lijn is de totale balans. Hieruit valt goed op te maken of een systeem in balans of onbalans is. Wanneer het WKO-systeem net in bedrijf is genomen, heeft het een opstarttijd van ongeveer drie jaar nodig voordat het systeem in balans kan zijn. In het begin is er namelijk nog geen warmte of koude opgeslagen in de bodem. Na een aantal jaren (in 2011) ontstaat er weer onbalans. Dit maal is er te veel koude geladen in de bodem. Na 2014 is er een extra theater aangesloten op het systeem waardoor er weer een balans is ontstaan (Hoefgeest, 2016).



Figuur 22: Overzicht van meer-jaren thermische balans van de WKO Chassépark in Breda

Bron: (Hydreco, 2016)

2.6 Samenvatting individuele WKO-systemen

De verschillende WKO-systemen zijn toegelicht. Hieronder in Tabel 1 is in het kort schematisch weergegeven wat de kenmerken van de verschillende WKO-systemen zijn.

Tabel 1: Eigenschappen van de WKO-systemen.

Systeem	Bron	Max. capaciteit	BVO (m ²)	Type pomp
Mono (open)	1 put, 2 thermische bellen	70 m ³ /uur	2.000 - 15.000	Waterpomp
Doublet (open)	2 putten, 2 thermische bellen	300 m ³ /uur	>20.000	Waterpomp
Recirculatie (open)	1 of 2 putten, 1 thermische bel	250 m ³ /uur	>2.000	Vacuümpomp
Verticaal (gesloten)	Gesloten lussen	20 - 50 W/m	<2.500	Circulatiepomp
Horizontaal (gesloten)	Gesloten lussen	20 - 30 W/m ²	<2.500	Circulatiepomp

Toelichting: maximum capaciteit open en gesloten systemen verschillen qua eenheid, omdat het bij open systemen om onttrokken grondwater gaat en bij gesloten systemen om hoeveel warmte er uit de bodem overgedragen wordt.

Uit deze tabel blijkt het volgende:

- Open systemen bestaan uit één of meerdere putten, gesloten systemen werken met lussen
- Binnen open systemen werken mono en doublet met 2 thermische bellen en recirculatie met één thermische bel

- Open systemen kunnen een grotere capaciteit onttrekken (door grondwater) dan van gesloten systemen, daarmee kunnen open systemen voor veel grotere BVO's functioneren. Dit beïnvloedt de toepassing van open en gesloten systemen: gesloten systemen komen meer voor bij woningen en kleine kantoorpanden/scholen etc.

De WKO- systemen die in dit hoofdstuk zijn genoemd komen allen voor als individueel systeem.

Uit dit hoofdstuk blijkt dat gesloten systemen eigenlijk alleen geschikt zijn voor kleinere projecten, zoals woningen en kleinere kantoren/scholen. Om deze reden worden gesloten systemen in dit onderzoek verder niet bestudeerd.

In het vervolg van dit onderzoek wordt er daarom gekeken of deze open individuele systemen verbonden kunnen worden. Wanneer er meerdere open WKO-systemen van verschillende of dezelfde types met elkaar verbonden zijn wordt er gesproken van een collectief WKO-systeem. Bij een collectief WKO-systeem kunnen meerdere partijen betrokken zijn. Deze partijen delen dan gezamenlijk één WKO-netwerk. In het volgende hoofdstuk worden de praktijkervaringen van zowel individuele als collectieve open WKO-systemen in Nederland besproken.

3. De praktijk van verschillende soorten WKO-projecten

3.1 Inleiding

De afgelopen 10 jaar zijn er steeds meer WKO-systemen in Nederland gekomen. De gebruikers van de WKO-systemen hebben een bepaalde vraag naar warmte en koude. Per gebruiker kan deze vraag verschillen. De WKO-systemen worden ontworpen op de verwachte behoefte van het gebouw. Maar deze ontwerpwaarden worden in de praktijk niet altijd gehaald, omdat het WKO-systeem niet optimaal blijkt te functioneren. Conventionele systemen moeten dan ingezet worden om de vraag van de gebouwen te kunnen leveren. Vanuit het oogpunt van energie-efficiëntie is het interessant om te onderzoeken of het koppelen van individuele systemen wenselijk is. Daarmee ontstaan collectieve systemen die beter elkaars overschotten en/of tekorten kunnen afstemmen. Dat kan bovendien leiden tot het niet meer hoeven inzetten van conventionele systemen.

In dit hoofdstuk wordt de praktijk van Nederlandse open WKO-systemen in kaart gebracht. Daarbij worden zowel cases van individuele als collectieve systemen behandeld. Per case wordt het volgende in kaart gebracht:

- Wat is het voor een soort systeem?
- Wat zijn de beschikbare ontwerp- en praktijkwaarden?
- Welke besparingen ten opzichte van conventionele systemen zijn er gerealiseerd?
- Welke ervaringen zijn er in het gebruik van de systemen?
- Welke energiebalans heeft het systeem?

Met deze beschrijving van de praktijkcases wordt de volgende deelvraag in het onderzoek beantwoord: *‘Wat zijn de ervaringen bij uitgevoerde WKO-projecten?’*

Om de informatie in dit hoofdstuk toegankelijk te ordenen wordt hier per paragraaf een bepaald type WKO-project in Nederland toegelicht. De onderscheiden WKO-typen in dit hoofdstuk zijn:

- Individueel mono (zie paragraaf 3.2)
- Individueel doublet (zie paragraaf 3.3)
- Individueel recirculatie (zie paragraaf 3.4)
- WKO-systemen met warmtepomp en cv-ketel (zie paragraaf 3.5)
- Collectief doublet (zie paragraaf 3.6)
- Thermisch verbinden (zie paragraaf 3.7)

In de paragrafen 3.2 t/m 3.7 worden de beschikbare ontwerpwaarden en praktijkwaarden van de WKO-systemen bekeken en vergeleken. In elke case gaat het om een van de WKO varianten, zodat er duidelijk naar voren komt hoe verschillende WKO-systemen functioneren in de praktijk. Per paragraaf zijn, indien beschikbaar, specifieke cases van een onderscheiden WKO-type beschreven. Met behulp van de WKO-tool en energieopgaves zijn de ervaringen met het WKO-systeem kort toegelicht. De WKO-tool is een database van de Rijksoverheid waarin ervaringen van meerdere WKO-projecten zijn opgenomen (zie www.wko-tool.nl). De visies van vier geïnterviewde deskundigen (T. Meulen, T. Buiting, L. den Dekker, J. Siemes) op de hen bekende WKO-projecten zijn ook verwerkt in de paragrafen. Een aandachtspunt in de interviews was waarom WKO-systemen nog in combinatie

worden gebruikt met conventionele systemen en het gebouw niet volledige op een WKO kan draaien.

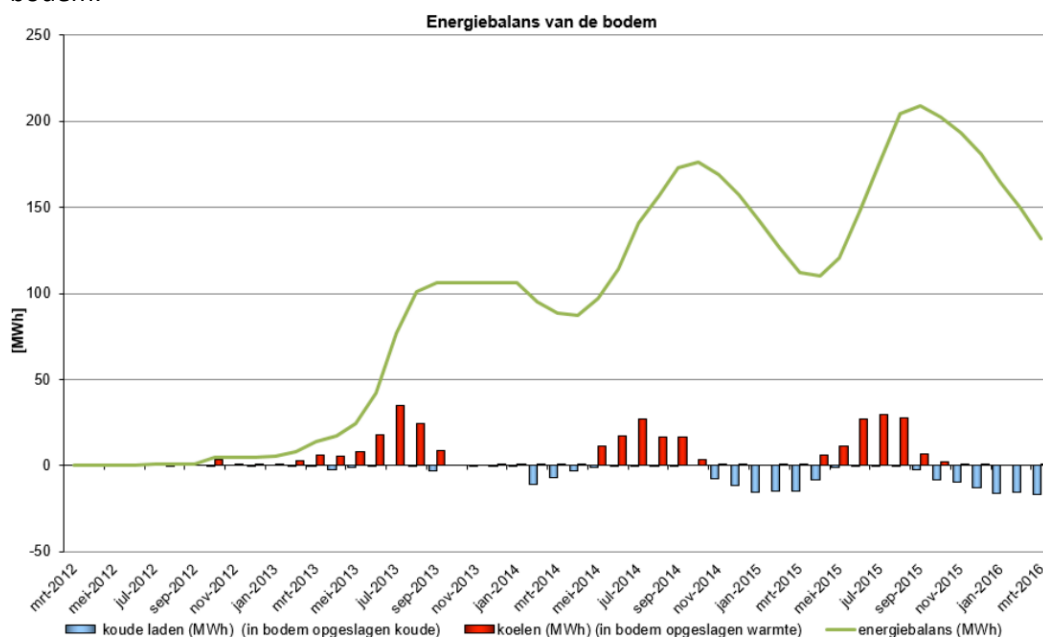
Het hoofdstuk wordt afgerond met een samenvattend overzicht waarin de soorten projecten met elkaar worden vergeleken (zie paragraaf 3.8). Op basis van deze samenvatting wordt een checklist van relevante criteria opgesteld. Daarmee wordt in hoofdstuk 5 de case Zuidas Noord geanalyseerd.

3.2 Individuele mono WKO-systemen

3.2.1 Monobron ARAG Rechtsbijstand in Leusden

Het ARAG Rechtsbijstand (Utiliteitsbouw) in Leusden heeft sinds oktober 2012 één monobron in bedrijf met een capaciteit van 30 m³/uur. Deze monobron is gecombineerd met een gasmotor-gedreven warmtepomp. Het energielabel van het gebouw is door de WKO en andere rendementsverbeteringen van F naar A gegaan. Het gebouw met een BVO van 10.000 m² heeft door het systeem een CO₂-reductieemissie van ca. 26.000 kg/jaar. Een groot probleem bij de analyse van dit project is dat er geen elektra- en gasverbruik van het systeem gemeten wordt, omdat dit niet noodzakelijkerwijs hoefde volgens de waterwetvergunning. Hierdoor is de energie-efficiëntie lastig te bepalen. Het is niet precies bekend wat de invulling van de monobron is op de jaarlijkse warmte- en koude-behoefte van het gebouw (WKO-tool, 2016).

Als er naar de energiebalans van de bodem (Figuur 23) gekeken wordt is te zien dat er een onbalans is ontstaan. Het gebouw heeft een relatief grotere koude-vraag en dus een warmteoverschot in de bodem.



Figuur 23: Energiebalans van de monobron ARAG Rechtsbijstand

Opmerking: ontwerpgegevens onbekend.

Bron: (WKO-tool, 2016)

Gemiddelde koude bron temperatuur: 9°C

Gemiddelde warmte bron temperatuur: 16,4°C

Gemiddelde ΔT gedurende het hele jaar: 3,3°C

3.2.2 Monobron St. Nicolaaslyceum in Amsterdam-Zuid

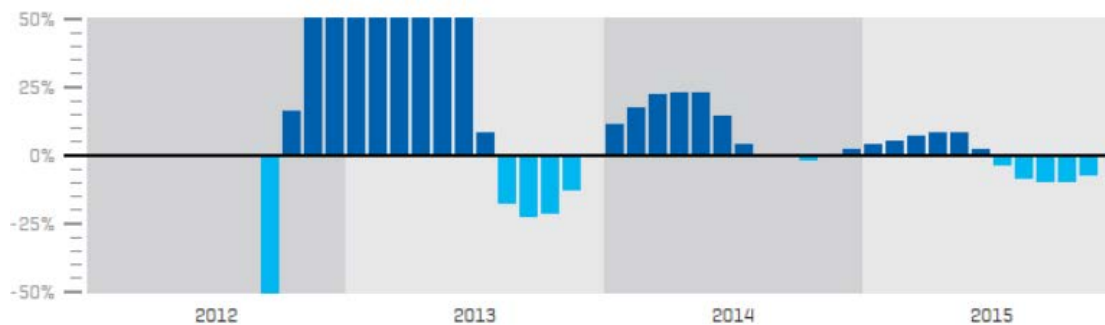
Een ander mono WKO-systeem ligt bij het St. Nicolaaslyceum in Amsterdam Zuid (WKO-tool, 2016). Deze middelbare school met een BVO van 12.000 m² is gebouwd in 2012. Sinds september 2012 maakt de school gebruik van een monobron met een capaciteit van 40 m³/uur om duurzaam energie op te slaan en te gebruiken. Met deze monobron is er een CO₂ reductie van 27.000 kg/jaar ten opzichte van een conventioneel systeem. Het gebouw heeft een relatief grotere vraag naar warmte. Om 's winters voldoende warmte te hebben tijdens piekmomenten, is er naast een warmtepomp een ketel geplaatst. De ontwerpgegevens van de monobron zijn in Tabel 2 weergegeven.

Tabel 2: Ontwerpgegevens van de monobron St. Nicolaaslyceum

Project	Bron	Pompcapaciteit (m ³ /uur)	Lengtefilter (m)	Ontwerp T (°C)
St. Nicolaaslyceum	Monobron warm	40	35	17
St. Nicolaaslyceum	Monobron koud	40	17	9

Bron: (Caljé, 2015)

Het verloop van de WKO balans van 2012 tot 2016 is te zien in Figuur 24. De figuur geeft de WKO balans maandelijks procentueel weer, waarbij het pluspercentage het koude-laden is. Er is te zien dat de WKO het eerst jaar nog aan het opstarten is, hierna komt het systeem goede in balans. Het binnenklimaat is comfortabel en er is de eerste jaren meer energie bespaard dan er verwacht werd. De school heeft 's winters een warmtevraag en 's zomers een koude-vraag, maar tussen juli en september is er zomervakantie. De school blijft in de zomervakantie wel koelen om een goed WKO balans te creëren en te houden. Dit resultaat is goed terug te zien: in de loop van de jaren wordt de balans beter.



Figuur 24: WKO Balans van de monobron bij het St. Nicolaaslyceum

Bron: (WKO-tool, 2016)

De koude-energie die de school in de zomervakantie gebruikt, zou gebruikt kunnen worden voor andere gebouwen met een koude-vraag. De energie zal dan gedeeld kunnen worden met een collectief WKO-systeem, dit zorgt er voor dat de school nog steeds zijn balans houdt en dat andere gebouwen niet zelf hoeven te koelen. Het WKO-systeem met de koude-vraag heeft hoogst waarschijnlijk een warmteoverschot deze wordt dan gebruikt voor de school. In Tabel 3 is de toegevoegde warmte en koude per jaar van het WKO-systeem weergegeven (kolom 3). Ook is aangegeven hoeveel de extra toegevoegde warmte aan de bodem in de zomervakantie bedraagt

(kolom 4). Deze extra toegevoegde warmte laat zien dat er extra gekoeld is in de zomer, zodat er meer warmte geladen wordt in de bodem.

Tabel 3: Toegevoegde warmte en koude aan de bodem van het St. Nicolaaslyceum (monobron)

	Onttrokken water (m ³)	Toegevoegde warmte/ koude aan bodem (MWh)	Toegevoegde warmte aan bodem juli/augustus (MWh)
Koude bron 2013	Niet bekend	170,6 (k)	
Warmte bron 2013	Niet bekend	177,0 (w)	125,9
Koude bron 2014	Niet bekend	131,5 (k)	
Warmte bron 2014	Niet bekend	117,3 (w)	68,0
Koude bron 2015	32.530	78,1 (k)	
Warmte bron 2015	20.030	135,4 (w)	89,0
Koude bron 2016	45.480	211,5 (k)	
Warmte bron 2016	36.890	178,4 (w)	79,2

Bron: (Omgevingsdienst Noordzeekanaalgebied, 2017)

Gemiddelde koude bron temperatuur: 10,2°C

Gemiddelde warmte bron temperatuur: 14,4°C

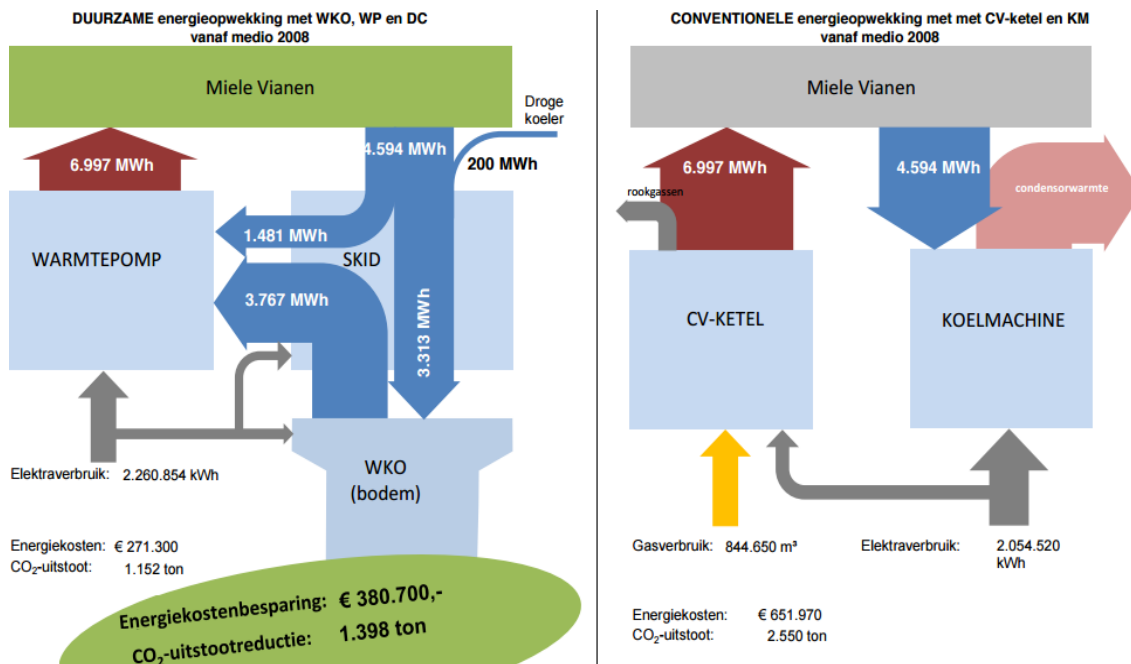
Gemiddelde ΔT gedurende het hele jaar: 4,2°C

3.3 Individuele doublet WKO-systemen

3.3.1 Hoofdkantoor Miele Nederland B.V. in Vianen.

In Vianen staat het hoofdkantoor van Miele Nederland B.V. (Utiliteitsbouw) dat in 2008 is gerenoveerd (WKO-tool, 2016). Het Hoofdkantoor, met een totaal oppervlakte van ca. 30.000 m², bestaat uit een Inspirience Centre, twee kantoorgedeeltes met bedrijfsrestaurant en een warehouse. Bij de renovatie is er ook een WKO-systeem toegepast. Het WKO-systeem is één doublet met een capaciteit van 100 m³/uur. De reden dat er een doublet is toegepast is het BVO van 30.000 m². Voor een monobron of een ander WKO-systeem is het moeilijk om de capaciteit te halen voor zo'n groot oppervlakte. Met behulp van een warmtepomp en twee cv-ketels wordt de laagwaardige temperatuur naar een comfortabele temperatuur omgezet. De redenen waarom partijen in Nederland nog steeds WKO-systemen met een warmtepomp én cv-ketel (gas) gebruiken wordt in paragraaf 3.5 toegelicht.

Verder wordt naast het gebruiken van het WKO-systeem warmte teruggewonnen uit een droge koeler. Een droge koele voegt extra koude toe aan de bodem waarmee de energetische onbalans kan worden gereduceerd. De uiteindelijke CO₂-reductie is 120.000 kg/jaar. In Bijlage 1.1 Gegevens Miele Nederland B.V. is een cumulatieve CO₂-reductie te zien van juni 2008 tot februari 2016.



Figuur 25: WKO-systeem Miele in Vianen (doubletbron)

Toelichting: Schematisch overzicht van opwekking met WKO (links) en opwekking met conventionele systemen de WKO niet gebruikt was (rechts).

Bron: (WKO-tool, 2016)

In Figuur 25 is een overzicht te zien van het Miele gebouw met WKO opwekking en een overzicht met conventionele opwekking. Bij de opwekking met WKO is te zien dat gebruik gemaakt wordt van een warmtepomp om de energie naar gewenste temperatuur te brengen. Ook is er te zien dat de droge koeler voor een klein deel van de warmte zorgt. SKID is het frame waar de droge koeler aansluit op het WKO-systeem. Door deze duurzame energieopwekking is er in de periode van juni 2008 tot februari 2016 een CO₂-reductie van 1.398 ton (1.398.000 kg). In het schema conventionele energieopwekking is te zien wat het verbruik en uitstoot geweest zal zijn als er voor een conventioneel systeem was gekozen.

Wanneer de waarden van beide systemen vergeleken worden is op te maken dat de WKO zeker 55% minder CO₂-uitstoot in een periode van 7 jaar en 8 maanden (zie Tabel 4). Het gehele WKO-systeem vraagt wel iets meer elektriciteit dan het conventionele systeem, maar dit compenseert met het gasverbruik van het WKO-systeem. Deze is namelijk 0 m³.

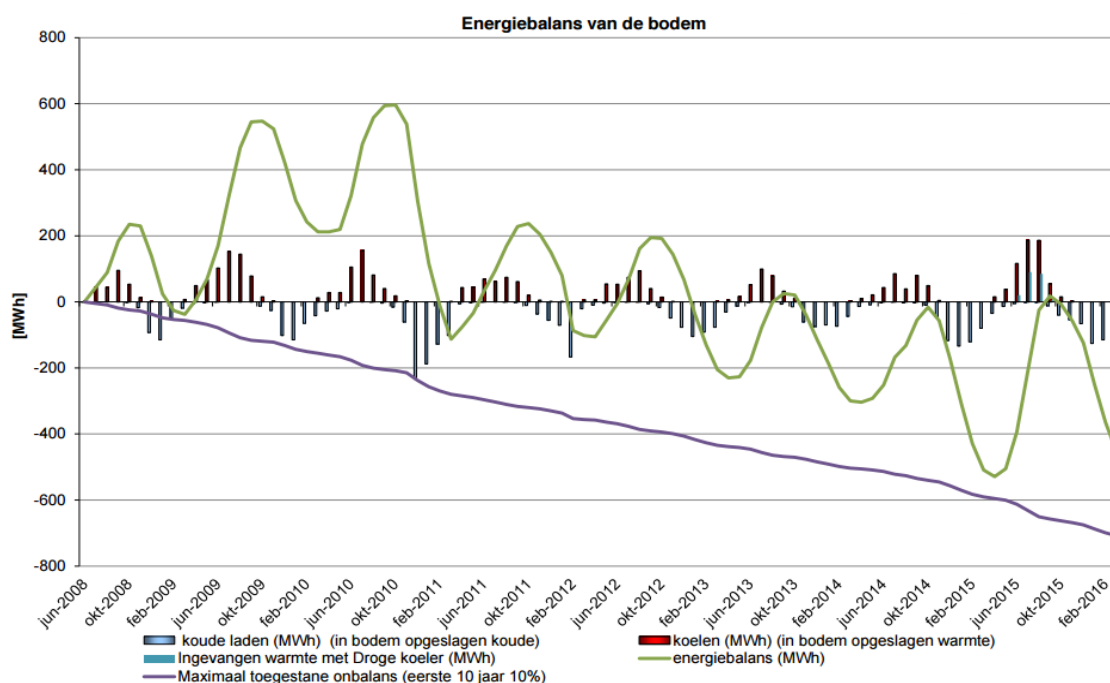
Tabel 4: Besparingen WKO-systeem Miele in Vianen (doubletbron)

	WKO	Conventioneel	Besparing WKO t.o.v. conventioneel	Procentuele besparing WKO
Elektraverbruik (MWh)	2.261	2.055	-206	-10%
Gasverbruik (m ³)	0	844.650	844.649	100%
CO ₂ -uitstoot (kg)	1.152.000	2.550.000	1.398.000	55%
Energiekosten	€ 271.300,00	€ 651.970,00	€ 380.670,00	58%

Toelichting: Overzicht tabel van gas- en elektraverbruik WKO-systeem (kolom 2) en conventioneel systeem (kolom 3) met de bijbehorende besparingen (kolom 4 en 5).

De energiebalans van dit WKO-systeem is terug te vinden in Figuur 26. Bij de opstart raakte het WKO-systeem uit balans, dit had vooral te maken met het feit dat de warmtepomp de eerste winter te weinig werd ingezet. Tijdens deze winter werden er vooral cv-ketels ingezet. Hierdoor werd er niet veel koude geladen in het WKO-systeem en ontstond er het jaar daarna een warmteoverschot (2009-2010). In het begin was er een slechte afstemming tussen het gebouwbeheersysteem en het WKO-systeem. Pas na enige tijd werden er goede afspraken gemaakt over de afstemming tussen het gebouwbeheersysteem en het WKO-systeem. Om de kans op een goed functionerend WKO-systeem te verhogen moet er goed gecommuniceerd worden tussen de gebruiker (Miele) en de beheerder. Ook is het van belang om het onderhoud en beheer bij één partij onderbrengen (Platform Duurzame Huisvesting, 2016).

Na 2010 is met behulp van de droge koeler de WKO weer redelijk in balans gekomen. Deze droge koeler helpt in koude winters extra koude te laden. Doordat er drie koude weken waren, is in die periode het warmteoverschot opgeheven. De jaren hierna wordt er meer koude geladen dan ontladen.



Figuur 26: Energiebalans WKO-systeem Miele in Vianen (doubletbron)

Bron: (WKO-tool, 2016)

De beheerder geeft in het interview aan dat wanneer men een maximaal rendement wil realiseren (dus een goede balans), niet alleen de vraag van het gebouw invloed heeft, maar ook de klimatologische omstandigheden. Zo kan een zachte winter consequenties hebben voor de balans. In dat geval zal er in het winterseizoen weinig koude worden geladen, waardoor er in de zomerperiode minder koude energie uit de bodem is te halen voor verkoeling van een gebouw.

Gemiddelde koude bron temperatuur: 9°C

Gemiddelde warmte bron temperatuur: 14,5°C

Gemiddelde ΔT gedurende het hele jaar: 5,5°C

3.3.2 Gebouw Groot Advocatenkantoor in Amsterdam

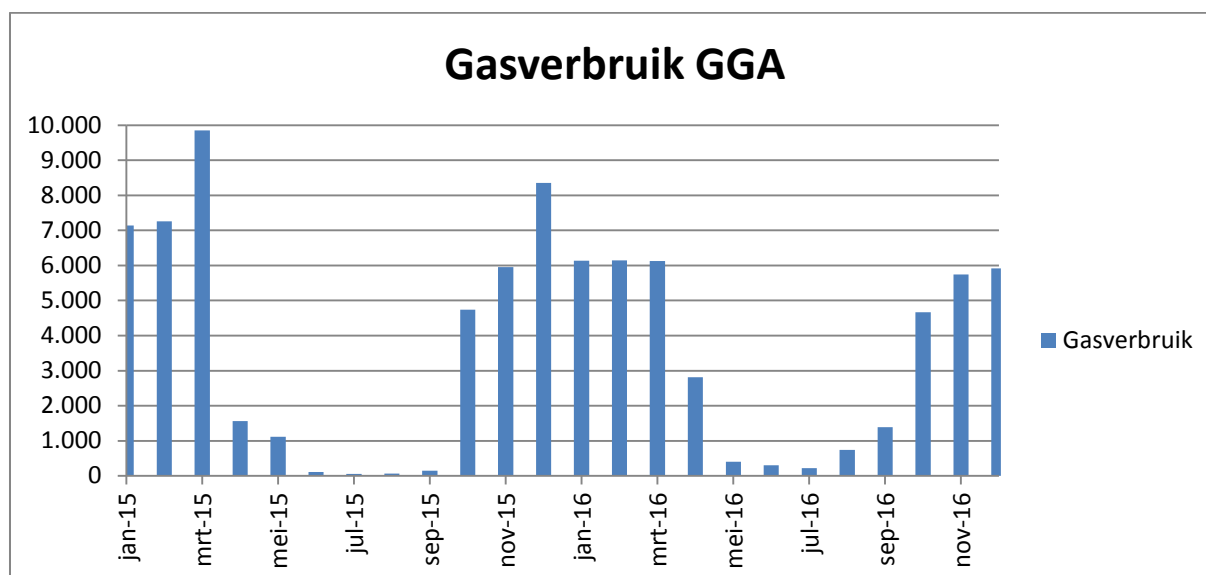
In Amsterdam heeft een groot advocatenkantoor ervaringen met WKO. Omwille van toegezegde anonimiteit wordt deze casus hier GGA genoemd. Het pand van GGA is aangesloten op een doublet met één koude bron en één warmte bron en deze voeden een BVO van 15.700 m² (Dienst Ruimtelijke Ordening Amsterdam, 2010). De bronnen zijn sinds 2001 in werking en de ontwerpwaarden van het doublet zijn hieronder te vinden (Tabel 5). Hier staat de derde kolom voor het vergund debiet dat de put mag pompen en de vierde kolom wat de ontwerpwaarde van ΔT is.

Tabel 5: Ontwerpwaarden van WKO-systeem GGA (doubletbron)

Project	Bron	Pompcapaciteit (m ³ /uur)	Lengtefilter (m)	Ontwerp T (°C)
GGA1	Doublet warm	95	50	15
GGA2	Doublet koud	95	50	9

Bron: (Caljé, 2015)

GGA heeft gegevens van hun energieverbruik en het WKO gebruik gedeeld. In Bijlage 1.2 Gegevens GGA (sub paragraaf 1.2.1) is het de jaarlijkse stroom- en gasverbruik van GGA te zien. In de periode van 2006 en 2016 heeft het kantoorgebouw van GGA een gemiddeld elektraverbruik van 2.750 MWh per jaar. Het elektra verbruik is redelijk hetzelfde door de jaren heen. In Figuur 27 is het gasverbruik van GGA per maand in 2015 (totaal 46.359 m³) en 2016 (totaal 40.602 m³) te zien. Er zijn kleine verschillen zichtbaar. Deze verschillen kunnen te maken hebben met de weeromstandigheden die in dat jaar voor zijn gekomen. Een WKO-systeem reageert heel direct op de lokale temperatuur van een dag. Een aantal dagen kan het tropisch warm zijn of juist ijskoud. De hoeveelheid van deze extreme dagen in een jaar heeft invloed op het WKO-systeem en het gasverbruik. Wanneer er meer tropische dagen zijn in één jaar t.o.v. andere jaren is de kans groot dat het gasverbruik minder zal zijn.



Figuur 27: Gasverbruik per maand van GGA 2015 – 2016

In Bijlage 1.2 Gegevens GGA (sub paragraaf 1.2.2) zijn de jaaropgaves van 2014 en 2016 van het WKO-systeem te zien. Niet alle gegevens zijn hier aanwezig. Zo zijn de temperatuurgegevens van 2014 niet correct. Van het jaar 2016 is alleen de toegevoegde warmte en koude aan de bodem

geheel bekend. De rest van de gegevens ontbreekt of is deels aanwezig. Voor het onttrokken water in 2016 is alleen de periode van juli tot en met december bekend.

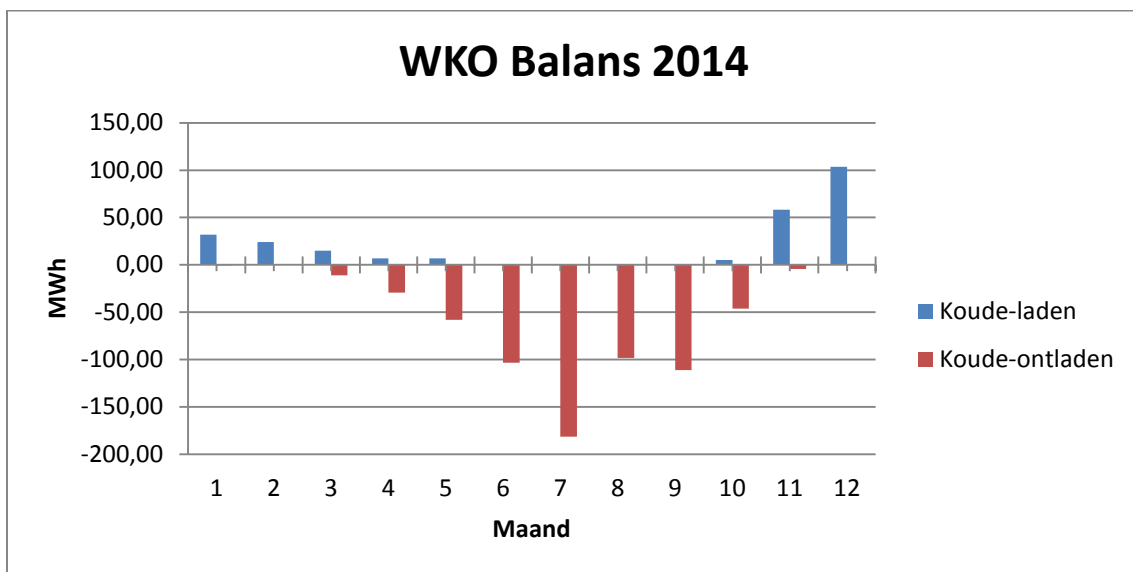
In Tabel 6 is er af te lezen dat de totaal toegevoegde warmte aan de bodem in 2014 en 2016 groter is dan de toegevoegde koude. Dit betekent dat er meer koude onttrokken wordt en daarvoor in de plaatst meer warmte in de bodem wordt gestopt. Verder wordt er ook meer grondwater onttrokken uit de koude bron dan uit de warmte bron.

Tabel 6: Overzicht totale jaaropgave WKO-systeem GGA 2014 en 2016

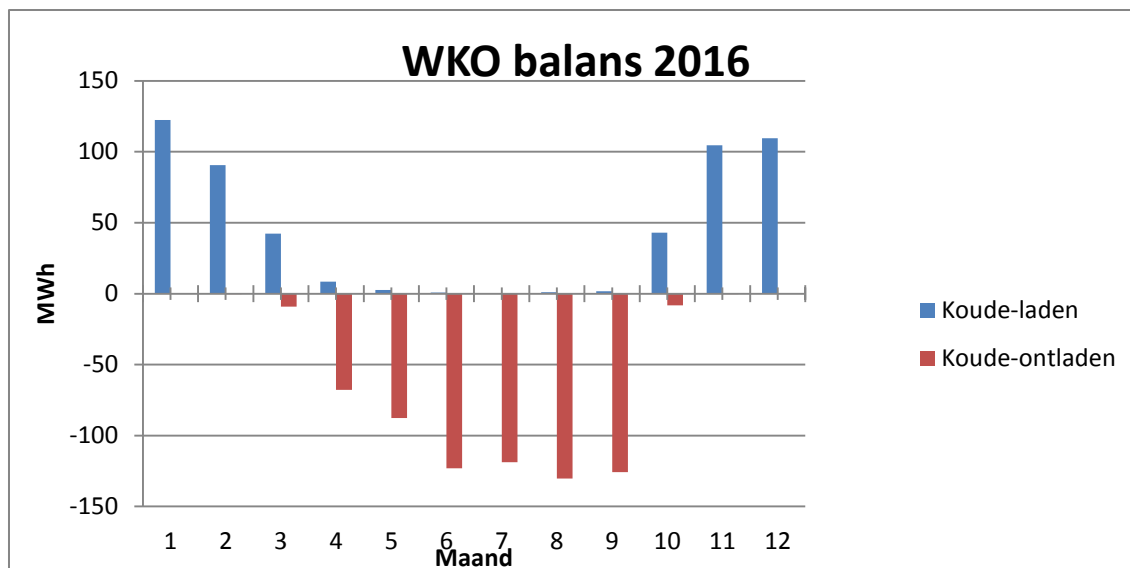
	Onttrokken water (m ³)	Toegevoegde warmte/koude aan bodem (MWh)
Koude bron 2014	153.290	254 (k)
Warmte bron 2014	55.060	644 (w)
Koude bron 2016	99.529*	527 (k)
Warmte bron 2016	39.651*	672 (w)

Toelichting: * = gegevens januari t/m juni ontbreken.

De toegevoegde warmte aan de bodem ligt in 2014 en 2016 redelijk rond dezelfde waarden. In de toegevoegde koude zit wel een groot verschil (ca. 300 MWh). In Figuur 28 en Figuur 29 is de balans van het WKO-systeem van 2014 en 2016 te zien.



Figuur 28: Energiebalans 2014 WKO-systeem GGA (doubletbron)



Figuur 29: Energiebalans 2016 WKO-systeem GGA (doubletbron)

Gemiddelde koude bron temperatuur: 8,4°C*

Gemiddelde warmte bron temperatuur: 14,1°C*

Gemiddelde ΔT gedurende het hele jaar: 5,7°C

Toelichting: * = de temperaturen zijn gebaseerd op de jaaropgaven van 2016, maar deze zijn niet geheel compleet. Daarom is er voor koude temperatuur de injectietemperatuur gekozen van de warmte bron en voor de warmte temperatuur de gemiddelde temperatuur van de juli tot december.

Wanneer er naar het gasverbruik, elektraverbruik, het BVO en de balans van het WKO-systeem gekeken wordt kan er een berekening gemaakt worden van wat de warmte- en koude-vraag is van GGA. De berekening wordt ook in de casestudie toegepast (zie hoofdstuk 5 voor de uitleg van de berekeningen). Uit de berekeningen komt naar voren dat GGA een grotere warmtevraag (1.048 MWh) heeft dan een koude (671 MWh). In Bijlage 1.2 Gegevens GGA (sub paragraaf 1.2.3) worden alle stappen ook uitgelegd op welke manier deze warmte- en koude-vraag is vastgesteld.

3.4 Individuele recirculatie WKO-systemen

Scholen in Utrecht

Vanaf augustus 2015 maakt het Kentalis College in Utrecht voor verwarming en koeling gebruik van een recirculatiesysteem met warmtepomp (Thijssen, 2016). Daarnaast is er nog een ketel, maar deze is alleen voor de warmwatervoorziening. De school is net nieuw gebouwd, heeft een BVO van ca. 2.700 m² en een energieklasser van A+. Scholen voor primair en voortgezet onderwijs zijn vaak klein en vragen relatief weinig warmte en koude. De scholen zijn juist in de hete zomermaanden dicht. Deze combinatie maakt het lastig om een doublet- of monosysteem in balans te krijgen.

Bijzonder aan het systeem van de school is dat de warmtepomp gecombineerd is met een relatief kleine recirculatiebron (9,9 m³/uur). Voor kleine systemen (<10 m³/uur) gelden geen vergunningseisen (RVO, 2016). Dit heeft als groot voordeel dat de verplichting voor een warmtebalans in de grond niet geldt. De kleine recirculatiebron is hierdoor een goede oplossing voor dit soort gebouwen.

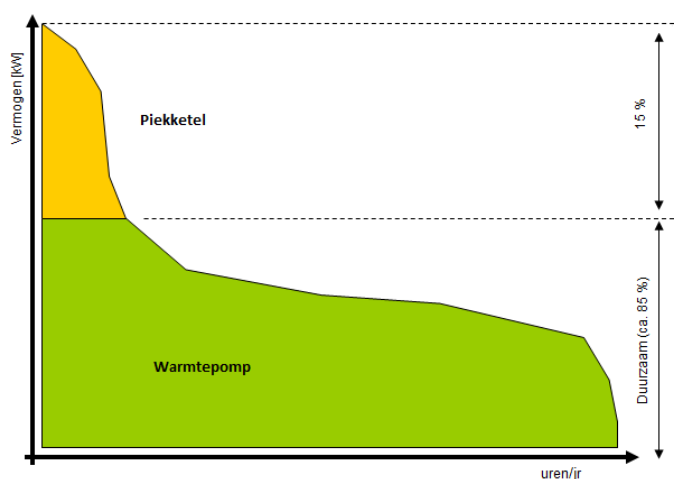
De Nieuwe Baarnse School heeft ook een recirculatiebron toegepast en is evenals het Kentalis College zeer tevreden over het systeem.

Het recirculatiesysteem is een goede oplossing voor nieuwe scholen. Het kan eenvoudig koeling leveren en de warmtepomp geeft comfort voor warmte temperaturen. Verder zijn er geen radiatoren nodig en kan er verwarmd worden door vloerverwarming (RVO, 2016).

3.5 WKO-systemen met warmtepomp en cv-ketel

Het blijkt dat in Nederland de nodige WKO-systemen nog met een cv-ketel als conventioneel back-up systeem draaien. Daarmee worden de imperfecties van het WKO-systeem ondervangen. In deze paragraaf is, als intermezzo op de praktijkcases van individuele WKO-systemen, dit principe nader toegelicht.

De warmtepomp zorgt voor de gewenste temperatuur in het gebouw. Toch komt het nog vaak voor dat voor verwarming van gebouwen naast de warmtepomp ook een cv-ketel wordt toegepast. Een WKO systeem wordt ontworpen op een verwachte warmte- en koude-vraag. In de praktijk is het mogelijk dat deze verwachting niet uitkomt, omdat de buitentemperaturen niet precies te voorspellen zijn. Voor de *koude-vraag* komt het vaak voor dat er berekeningen worden gemaakt met een te hoge koude-vraag dan dat er in de praktijk nodig is. De *warmtevraag* is beter te voorspellen, omdat de capaciteit voor een piek van 100% alleen nodig als het erg koud is buiten (denk aan -10°C). Deze koude temperaturen komen in Nederland niet vaak voor, daardoor zijn de voorspellingen meer accuraat. Het merendeel van de tijd heb je niet veel vermogen nodig om de opgeslagen temperatuur te verhogen tot een aangename temperatuur voor het gebouw. Ca. 85% kan met een warmtepomp gerealiseerd worden. Soms kunnen koude temperaturen voorkomen. Om de benodigde verwarming bij deze koude pieken (15%) te halen wordt er meestal gebruik gemaakt van cv-ketels. In Figuur 30 is te zien hoe de piek met een cv-ketel (geel) wordt ingevuld en de rest met een warmtepomp (groen). Met op de x-as de uren per jaar dat een cv-ketel of warmtepomp aanstaat en de y-as het vermogen dat geleverd moet worden om het gebouw op een aangename temperatuur te krijgen.

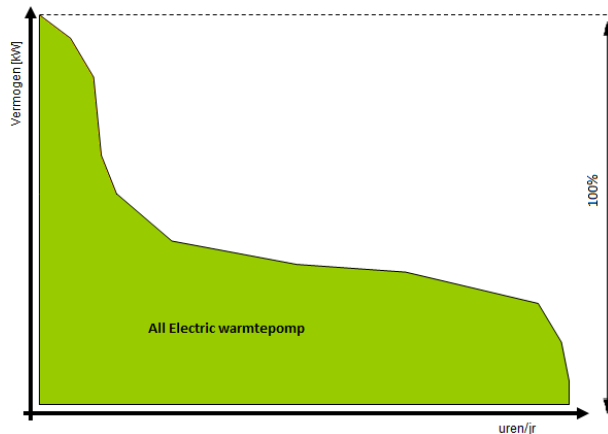


Figuur 30: Inzet conventionele cv-ketel in WKO-systeem

Toelichting: Een beeld van hoe vaak een ketel wordt ingezet om de piek te halen t.o.v. een warmtepomp.

Bron: (Slot, 2009)

Het is mogelijk om alleen een warmtepomp toe te passen, maar dan heb je een grotere warmtepomp nodig die niet vaak op vol vermogen draait. Eigenaren van kantoren vinden dit een slechte investering en installeren daarom een cv ketel naast de warmtepomp. Het gas van de cv-ketel is duurder maar de cv-ketel hoeft niet vaak aan te staan in een jaar. In gebouwen die All Electric zijn, wordt er alleen een elektrische warmtepomp gebruikt (Figuur 31). De installatie investering is duurder, maar het is wel duurzamer (den Dekker, 2017).



Figuur 31: Principe All Electric Warmtepomp

Bron: (Slot, 2009), bewerking

Wanneer meerdere type gebouwen één WKO-systeem delen (collectief), zal de piek van de figuren er anders uit zien. De piek voor het inzetten van een cv-ketel is minder. Stel er is een WKO-systeem dat aangesloten is op een mix van woningen, kantoren, scholen, dan zullen deze type gebouwen de piek op een ander moment hebben. Daarnaast is het mogelijk dat er een mix van warmte- en koudevragers aangesloten is op het WKO-systeem. De verschillende vraag naar warmte en koude zorgt er voor dat die piek 'gecompenseerd' kan worden. Voor deze beide gevallen hoeft er minder capaciteit ingezet te worden, dan wanneer de gebouwen de pieken of dezelfde vraag gelijk zouden hebben.

3.6 Collectieve doublet WKO-systemen

Het collectieve mono WKO-systeem komt in de praktijk nog niet voor, omdat de aquifer een minimale dikte nodig heeft om mono-systemen te plaatsten. In Nederland is dit niet overal mogelijk (zie ook paragraaf 2.3.2.1 voor de uitleg hiervan). Daarom wordt voor collectieve WKO-systemen alleen op de praktijk van doubletbronnen ingegaan.

3.6.1 Radboud Universiteit in Nijmegen

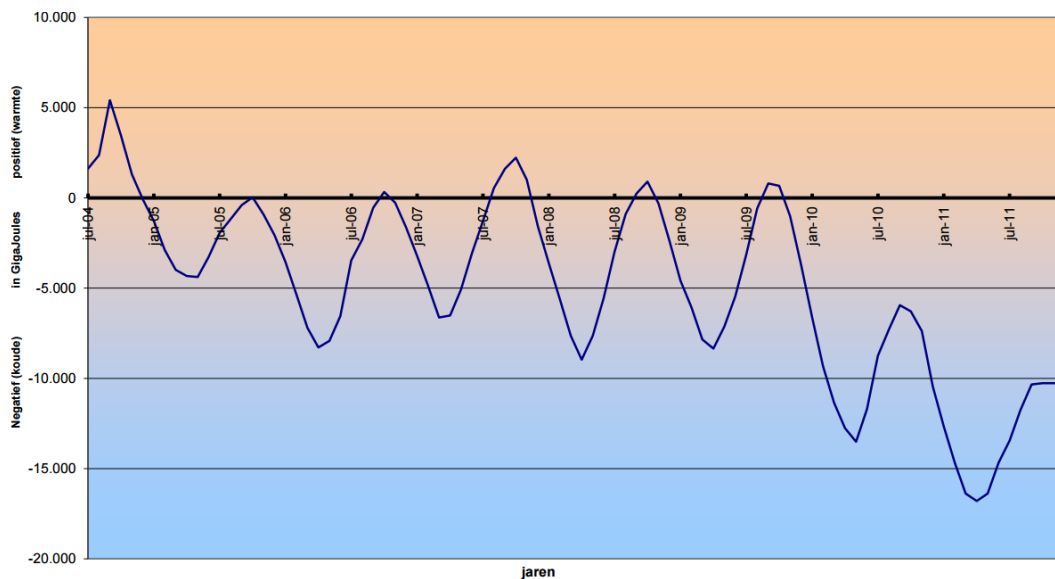
De Radboud Universiteit heeft een eigen WKO-systeem met meerdere bronnen, gebouwaansluitingen en een leidingnet. De omvang van het huidige WKO-systeem van de Radboud Universiteit is in Figuur 32 weergegeven.



Figuur 32: Overzicht van het WKO-systeem Radboud Universiteit (collectief doubletsysteem)

Bij de Radboud universiteit zijn het Huygensgebouw en Linnaeusgebouw in 2004 aangesloten op een WKO-systeem. Het systeem heeft vijf warmte en vijf koude bronnen met elke bron een capaciteit van 90 m³/uur (per cluster 450 m³/uur). De reden dat alle bronnen zich aan de rand van het universiteitsterrein bevinden is dat er onder het terrein zelf drinkwater wordt onttrokken. Hier mag geen warmte en koude opgeslagen worden en kunnen er geen WKO putten geslagen worden. De bronnen moeten tot het Grotiusgebouw kunnen transporteren (ca. 1,4 km).

De gebouwen hadden een grotere warmtevraag dan een vraag naar koeling, waardoor er een koudeoverschot is ontstaan (Figuur 33). De stijging van het koude-overschot in 2010 tot eind 2011 heeft te maken met onderhoud. In die periode werd het WKO-systeem geoptimaliseerd.



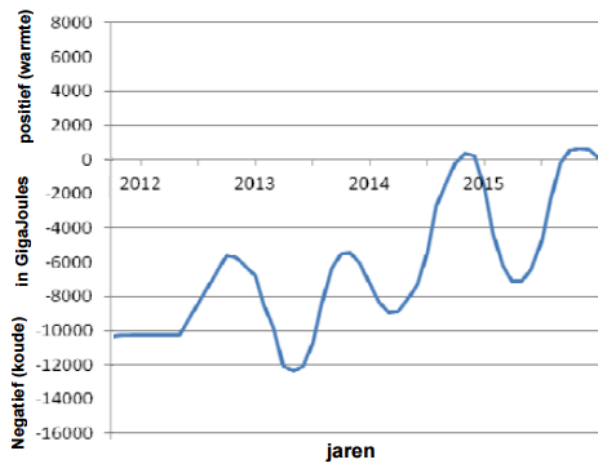
Figuur 33: Verloop energiebalans WKO-systeem Radboud Universiteit (collectief doubletsysteem)

Toelichting: Verloop van juli 2004 tot augustus 2011.

Bron: (Buiting, 2013)

Op het universiteitsterrein ligt ook een magnetenlaboratorium (HFML). Het laboratorium heeft een grote koelvraag en stoot veel warmte die vrijkomt bij het koelen af aan de buitenlucht. In 2012 is het laboratorium ook gekoppeld aan het WKO-systeem. De vrijkomende warmte van het laboratorium wordt meteen benut voor verwarming van het Huygensgebouw of opgeslagen in de warmtebronnen van het WKO-systeem. Door deze extra warmte is het koude-overschot verminderd en de energiebalans van warmte en koude hersteld. Dit is te zien in Figuur 34.

Vervolgens is in 2013 het Grotiusgebouw aangesloten op het WKO-systeem en is het systeem door Smart Grid toepassing efficiënter gemaakt. Een Smart Grid is een systeem dat elektriciteit via een intelligent vraag- en aanbodmechanisme verspreidt. Er is een hybridesysteem (warmtepomp en cv-ketel) ontwikkeld dat automatisch op de meeste efficiënte wijze schakelt tussen energie uit eigen of externe bronnen. Het slimme systeem stuurt aan op een meer evenwichtig energiegebruik op jaarbasis. In 2014 is het koude-overschot van het WKO-systeem opgeheven.



Figuur 34: Verloop energiebalans WKO-systeem Radboud Universiteit (collectief doubletsysteem)

Toelichting: Verloop van augustus 2011 tot januari 2016.

Bron: (Buiting, 2016)

De Radboud Universiteit stelt dat hoe meer gebouwen aangesloten worden op het WKO-systeem hoe hoger het rendement van de installatie wordt. Het WKO-systeem van de Radboud Universiteit heeft een twee-pijpen leidingennet, één leiding voor warmte, één leiding voor koude. Via dit leidingennet (zie ook Figuur 32) kan er onderling grondwater uitgewisseld worden, zonder dat het grondwater eerst in de WKO bronnen wordt geïnjecteerd. Wanneer een gebouw warmte afstaat kan deze warmte direct getransporteerd (via drukverschillen) worden naar een gebouw dat warmte nodig heeft. Dit is zeker gunstig wanneer een gebouw dat warmte afgeeft een lagere temperatuur heeft dan wat er in de warmtebron aanwezig is. Het lagere temperatuurverschil zou leiden tot het afkoelen van de warmtebron in plaats van warmte toevoegen. Er mag bij dit systeem alleen warmte of koude geïnjecteerd worden als deze een positief effect heeft op de brontemperatuur. Dit systeem wordt beheerd door het Universitair Vastgoedbedrijf.



Figuur 35: Twee-pijpen leidingennet Radboud Universiteit (collectief doubletsysteem)

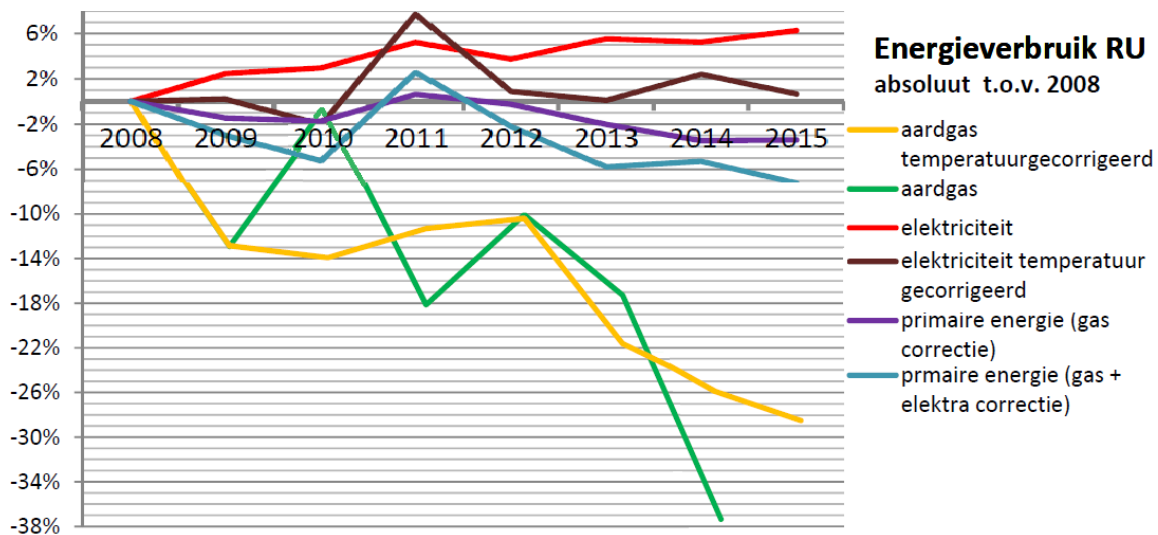
Toelichting: Aanleg twee-pijpen leidingennet voor warmte en koude transport WKO-systeem Radboud Universiteit.

Bron: (Radboud Universiteit, 2013)

Daarnaast heeft het direct uitwisselen van grondwater tussen gebouwen nog een groot voordeel. Omdat niet al het grondwater uit de aquifer onttrokken hoeft te worden, is er een besparing op de maximale onttrekking van het grondwater. Het directe uitgewisselde grondwater wordt niet meegeteld in de vergunde capaciteit. Hierdoor kunnen andere gebouwen ook aangesloten worden op het WKO-systeem zonder dat er snel nieuwe warmte en koude bronnen geslagen moet worden. Door het uitwisselen is de hoeveelheid verpompt grondwater in het systeem met 58% gereduceerd. Verder vragen de bronpompen hierdoor ook nog eens minder elektriciteit. In 2016 is het systeem verder uitgebreid met het Gymnasiongebouw. In 2019 wil de Radboud Universiteit het gebouw van de Faculteit Sociale Wetenschappen ook aansluiten op het WKO-systeem.

Door al deze koppelingen is het gasverbruik van de universiteit flink gedaald. In Bijlage 1.3 Gegevens Radboud Universiteit is een tabel te zien met een overzicht van energieverbruik in de periode 2008 tot en met 2015. In Figuur 36 is het verloop van het energieverbruik in een grafiek te zien. Bij het elektriciteit- en aardgasverbruik zit een correctie in van een graaddagenmethode naar een gemiddeld jaar. Dit wil zeggen dat er een indicatie is gedaan van het verbruik met de gemiddelde temperatuur van de afgelopen 15 jaar.

In de tabel en de grafiek is duidelijk te zien dat het gasverbruik in 2012 en 2013 erg afneemt. Dit komt onder andere door de aansluiting van het laboratorium en het Grotiusgebouw op het WKO-systeem en deels door andere duurzame energiesystemen (zonnepanelen). Het gasverbruik (temperatuur gecorrigeerd) is tussen 2008 (vóór de optimalisatie) en 2015 gedaald met ca. 28% (zie gele lijn in grafiek).



Figuur 36: Energieverbruik van de Radboud Universiteit in de periode 2008 tot 2016

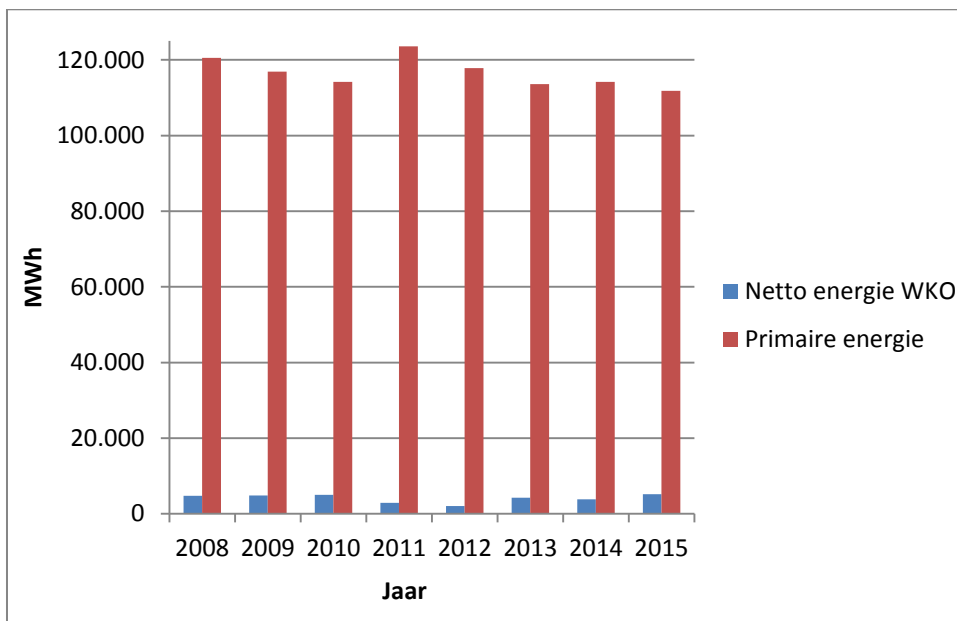
Bron: (Buiting, 2016)

In de Tabel 7 en Figuur 37 is duidelijk te zien wat de invulling van het WKO-systeem per jaar is. De lagere opwekking in 2011 en 2012 heeft te maken met de optimalisatie van het WKO-systeem. In 2015 is de opwekking 111.813 MWh. Vóór de optimalisatie werd dit ook ongeveer het systeem gehaald. Wanneer er alleen gekeken wordt naar de opwekking van het WKO-systeem lijkt het of de nieuwe aansluitingen niet veel geholpen hebben, maar in het primaire energieverbruik per jaar zit wel een daling. Het percentage verschil tussen 2009 (voor de optimalisatie) en 2015 is ca. 3,8%.

Tabel 7: Duurzame energie opwekking en totale energieverbruik van de Radboud Universiteit

Duurzame energie	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Netto duurzame energie WKO (MWh/jaar)	4.802	4.851	5.049	2.880	2.092	4.241	3.873	5.218
Zelfopgewekte zonnestroom (MWh/jaar)	2	2	2	3	7	7	65	82
totaal zelfopgewekte duurzame energie (MWh/jaar)	4.804	4.853	5.051	2.883	2.099	4.248	4.038	5.300
Totale energieverbruik (MWh/jaar)	120.525	116.914	114.200	123.616	117.860	113.572	114.160	111.813

Bron: (Buiting, 2016), bewerking



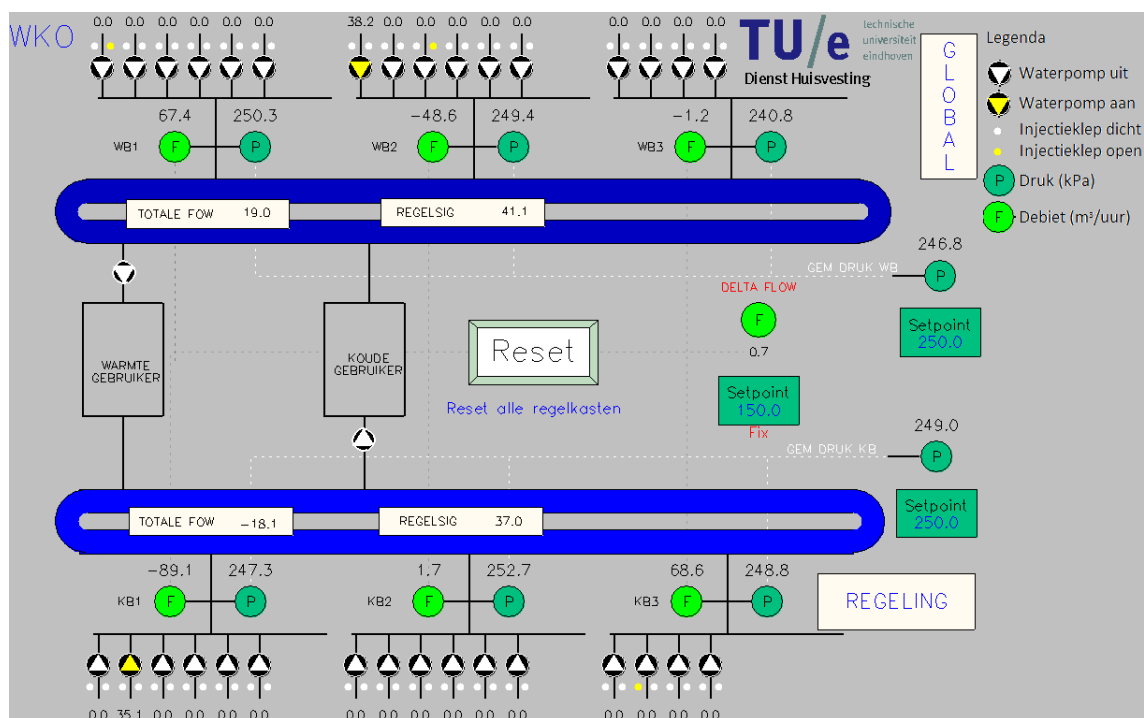
Figuur 37: Opwekking met WKO-systeem en de primaire energieverbruik van de Radboud Universiteit

Gemiddelde koude bron temperatuur: 9°C
 Gemiddelde warmte bron temperatuur: 15°C
 Gemiddelde ΔT gedurende het hele jaar: 6°C

3.6.2 TU Eindhoven

De TU Eindhoven heeft één van de grootste WKO installaties van Europa. TU Eindhoven had vroeger een bronwatersysteem dat ingezet werd voor koeling van de campus. Op een gegeven moment eiste de provincie dat het bronwatergebruik van 1.700.000 m³ terug moest naar 0 m³. Hierdoor kon de TU Eindhoven niet meer koelen met bronwater en moest overgaan op een andere methode. Ze hadden de keuze om gebruik te maken van koelmachines of om voor een duurzame oplossing te gaan. Gekozen is voor een duurzame oplossing door een WKO-systeem te realiseren op de campus van de TU Eindhoven. Dit gebeurde in 1999, maar de ontwikkeling van WKO-systemen was op dat moment nog niet ver. Er waren destijds nog bijna geen WKO-systemen. De TU Eindhoven was een van de eerste organisaties die daarmee aan de slag ging.

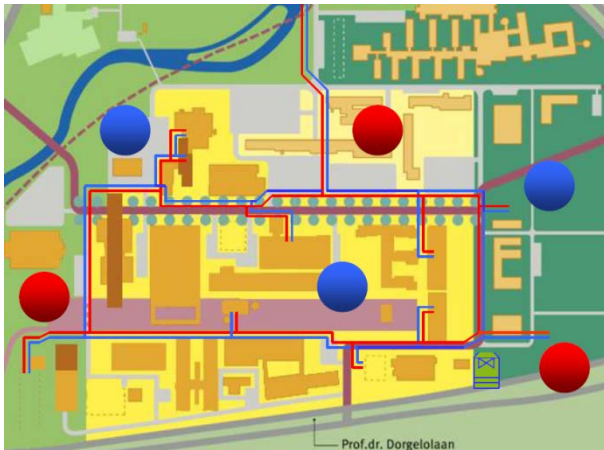
In de eerste stap heeft de TU Eindhoven geëxperimenteerd met een doublet. In Figuur 38 is een schematische overzicht te zien van het huidige WKO-systeem. Er is nu een systeem met 32 bronnen met een totale capaciteit van 2000 m³/uur. Deze zijn verdeeld over drie warmte en drie koude clusters, waarbij elk cluster 4 tot 6 putten heeft. Het gehele WKO-systeem bestaat uit twee ringleidingen (warmte- en koude-ring). De aangesloten gebouwen zijn via vier leidingen en twee warmtewisselaars verbonden met de ring-leidingen. Deze vier leidingen bestaan uit twee warmte en twee koude leidingen (aanvoer en retour). In Figuur 39 is een schematisch opbouw van het systeem te zien.



Figuur 38: Schema van het collectieve WKO-systeem TU Eindhoven

Toelichting: Zie legenda linksboven voor uitleg symbolen.

Bron: (Meulen, 2016)



Figuur 39: Ringleidingnet van het WKO-systeem TU Eindhoven (collectief doubletsysteem)

Toelichting: links het verloop van het ringleidingnet op de campus van de TU Eindhoven en rechts aanleg van twee ringleiding.

Bron: (Meulen, 2016)

Het ringleidingensysteem heeft de warmte en koude ring op een continue druk van 2,5 bar (250 kPa). Wanneer een gebouw een warmtevraag heeft, zal de druk zakken, om de druk te handhaven komt er een pomp-opgave bij. Hoe meer warmtevragers er zijn hoe meer pomp-opgaves er bij komen. Het koude water dat dan van het gebouw komt, wordt via de koude retourleiding weer richting een koude cluster getransporteerd. In het koude cluster staat dan één injectieklep open (Figuur 38 gele puntjes) waar het grondwater door de druk dan naar toestroomt. Als er koude of warmte wordt gepompt staat er altijd één frequentie-gestuurde pomp aan. Wanneer deze pomp op maximaal vermogen draait (voor een warmte of koude vraag) en er komt nog meer vraag bij, dan zal één van de andere pompen in het cluster aanslaan. Deze cyclus gaat zo constant door, mits er vraag is van de gebouwen. Dit systeem wordt via een Smart Grid aangestuurd.

Het WKO-systeem van de TU Eindhoven kan dus gelijktijdig warmte en koude leveren aan de aangesloten gebouwen door de vier leidingen en twee warmtewisselaars. Wanneer warmte en koude via de retourleidingen weer geloosd wordt op ringleidingen, kan er net als bij de Radboud Universiteit direct warmte en koude uitgewisseld worden. Hiervoor moet wel de druk in de leidingen gehandhaafd worden. Met de kleppen in het WKO-systeem kunnen ze het grondwater naar de juiste gebouwen sturen.

De TU Eindhoven is bij de aanleg van het WKO-systeem gestart met één warmtevragers, één koudevragers en tien gecombineerde vragers. De TU Eindhoven heeft totaal een grotere koude-vraag. Om het systeem in balans te houden moesten er twee koeltorens komen. Het systeem is inmiddels uitgebreid naar veertien gebouwen.

De volgende fase van de TU Eindhoven is de campus volledig op het WKO-systeem te laten draaien en geen gas meer te gebruiken. Op dit moment zijn er al vier gebouwen gasloos en in 2018 zullen er vijf gebouwen gasloos zijn. Deze gebouwen worden verwarmd en gekoeld met de warmtepompen die All Electric zijn. In Tabel 8 en Tabel 9 is het elektra-, gas- en totale energieverbruik van de campus weergegeven. Er is in de vergelijkingen te zien dat het elektraverbruik over 10 jaar iets gestegen (ca. 4,9%, zie meest rechtse kolom in Tabel 8) is en dat het gasverbruik flink gedaald is in 2015 (in vergelijking met 2005). Zo'n 56% minder gas is er gebruikt (zie rechtse kolom in Tabel 9). De oorzaak

van deze stijging en daling is dat er steeds meer gebouwen op het WKO-systeem zijn aangesloten. In Bijlage 1.4 Gegevens TU Eindhoven is te zien welke gebouwen zijn aangesloten op het WKO-systeem en wat het verbruik per gebouw is. Verder is er ook te zien hoeveel warmte en koude het WKO-systeem per gebouw levert en wat het WKO-systeem zelf nodig heeft qua elektrische energie. Van het totale elektrische energieverbruik vraagt de WKO maar 3% (zie tabel in Bijlage 1.4 Gegevens TU Eindhoven)

Tabel 8: Elektraverbruik en –vergelijking TU Eindhoven in de periode 2005 tot 2015

Elektraverbruik t.o.v. 2005 in kWh en procenten											
	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Gebruik	36.776.648	37.342.864	38.573.798	37.817.032	39.155.132	42.130.720	41.471.474	39.549.412	39.654.342	39.392.620	38.585.770
verschil	0	566.216	1.797.150	1.040.384	2.378.484	5.354.072	4.694.826	2.772.764	2.877.694	2.615.972	1.809.122
%	100,00%	101,54%	104,89%	102,83%	106,47%	114,56%	112,77%	107,54%	107,82%	107,11%	104,92%
abs %	0,00%	1,54%	4,89%	2,83%	6,47%	14,56%	12,77%	7,54%	7,82%	7,11%	4,92%

Bron: (Meulen, 2016)

Tabel 9: Gasverbruik en -vergelijking TU Eindhoven in de periode 2005 tot 2015

Gasverbruik gemaakt in graaddagen t.o.v. 2005 in m ³											
	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Gebruik	6.882.489	6.316.024	6.100.842	6.267.762	6.615.283	5.553.075	4.264.300	4.254.504	3.955.186	3.121.508	2.741.740
Grdagen	2792	2671	2565	2816	2877	3275	2533	2.866	3.042	2369	2659
gecorr	6.882.489	6.602.149	6.640.761	6.214.344	6.419.837	4.734.102	4.700.326	4.144.653	3.630.138	3.678.873	2.878.879
%	100,00%	95,93%	96,49%	90,29%	93,28%	68,78%	68,29%	60,22%	52,74%	53,45%	43,61%
abs%	0,00%	-4,07%	-3,51%	-9,71%	-6,72%	-31,22%	-31,71%	-39,78%	-47,26%	-46,55%	-56,39%

Bron: (Meulen, 2016)

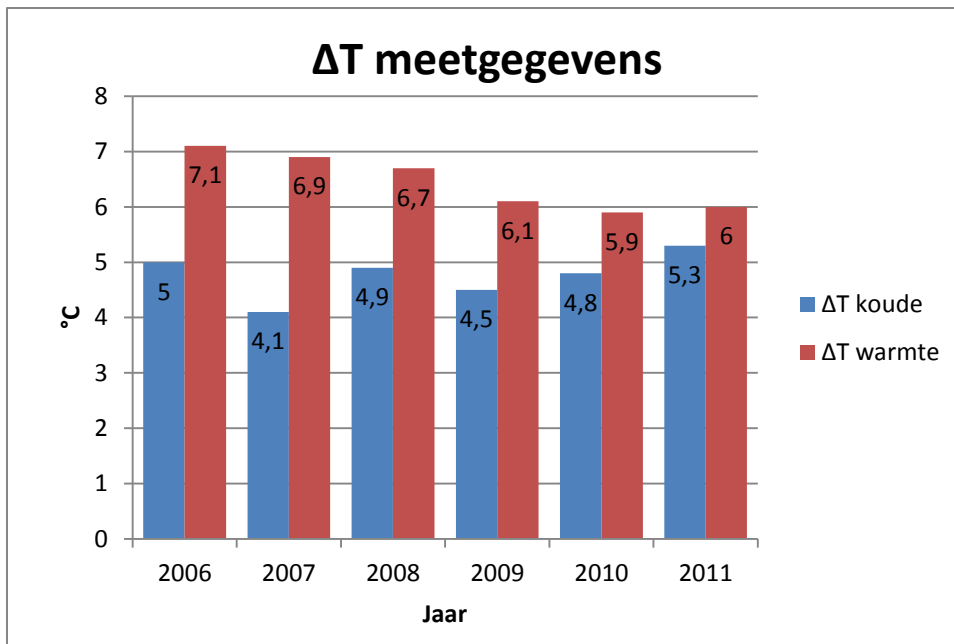
In Tabel 10 is de totale energieverbruik van de hele campus te zien. Vanaf 2005 is het totale energieverbruik gezakt met 20% (meest rechtse kolom).

Tabel 10: Totaal energieverbruik en -vergelijking TU Eindhoven in de periode 2005 tot 2015

GJ vergelijk totaal energie t.o.v. 2005											
	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Aardgas	217.831	208.958	210.180	196.684	203.188	149.834	148.765	131.178	114.894	116.436	91.117
Elektra	330.990	336.086	347.164	340.353	352.396	379.176	373.243	355.945	356.889	354.534	347.272
Totaal	548.821	545.044	557.344	537.037	555.584	529.011	522.009	487.123	471.783	470.970	438.388
%	100,00%	99,31%	101,55%	97,85%	101,23%	96,39%	95,11%	88,76%	85,96%	85,81%	79,88%
abs %	0,00%	-0,69%	1,55%	-2,15%	1,23%	-3,61%	-4,89%	-11,24%	-14,04%	-14,19%	-20,12%

Bron: (Meulen, 2016)

Bij het in bedrijf nemen van de WKO had de bodem een gemiddelde temperatuur van 11,5°C. De ontwerpwaarden die de TU Eindhoven heeft genomen voor het temperatuurverschil tussen de warmte en koude bronnen is 7°C. Hiervoor zal er 8°C of lager geïnjecteerd moeten worden in de koude bronnen en 15°C of hoger in de warmtebronnen. In Figuur 40 is het gerealiseerde temperatuurverschil tussen de warmte en koude bronnen in de periode van 2006 en 2011 vergeleken. De ontwerpwaarden zijn niet alle jaren gehaald, zeker niet voor de koude bronnen. De gebouwen hebben minder afgenomen van het WKO-systeem dan ze zouden moeten doen, waardoor de 8°C niet gehaald is. Dit komt omdat de aansluitvoorwaarden bij sommige gebouwen niet worden nageleefd. Bovendien is in de periode april – mei de afname wisselend tussen koude en warmtegebruik. De afname in deze maanden is laag, waardoor de gewenste injectietemperatuur (ontwerpwaarde) niet wordt gehaald. Er wordt verwacht dat wanneer de overige gebouwen op de campus worden aangesloten, de ontwerpwaarden zullen worden gehaald (Meulen, 2016).



Figuur 40: Overzicht van behaalde temperatuurverschillen van de TU Eindhoven

Toelichting: Ontwerpwaarde van het WKO-systeem is 7°C, in de figuur is te zien wat de behaalde ΔT van koude (onttrekking en infiltratie temperatuur) en warmte (onttrekking en infiltratie temperatuur) per jaar is (collectief doubletsysteem).

3.7 Thermisch verbinden van WKO-systemen

3.7.1 Definitie thermisch verbinden

Thermisch verbinden is het gebruik maken van de nabijheid van bronnen van gelijke temperatuur. Wanneer twee WKO-systemen elk hun warmte bellen én hun koude bellen verbinden kan ieder systeem afzonderlijk profiteren van warmte- of koude-overschotten uit het andere systeem. Wanneer de warmte of koude bellen van verschillende WKO-systemen aan elkaar gekoppeld worden ontstaat er een positieve interferentie, waardoor het rendement van het systeem juist groter wordt (zie paragraaf 2.5.8).

3.7.2 Sciencepark UvA en datacenter Equinix

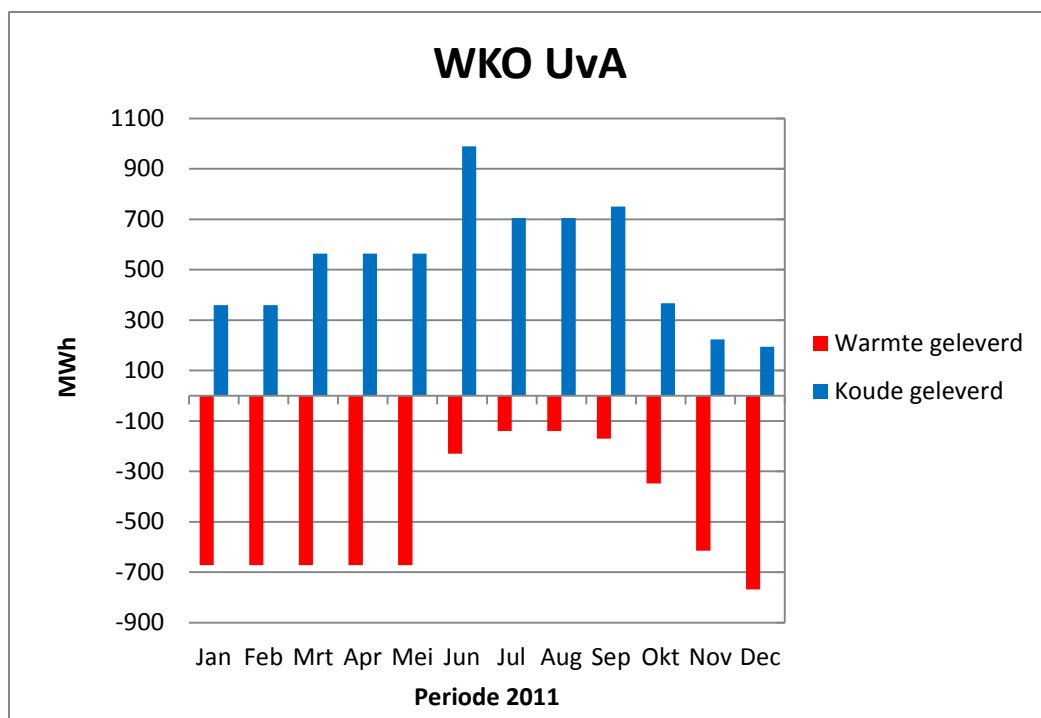
Het Sciencepark UvA en datacenter Equinix zijn twee aparte complexen die geografisch naast elkaar liggen. Ze hebben beide een WKO-systeem. Het Sciencepark UvA is een universiteitsterrein met meerdere gebouwen. Voor dit terrein is een masterplan WKO bedacht, waarin aangegeven staat waar de bronnen komen te liggen en hoe deze het beste gestructureerd kunnen worden. In 2006 zijn er bij Sciencepark twee doubletbronnen (4 putten) geplaatst waar elke bron ca. 225 m³/uur heeft. Het Sciencepark UvA is een goed voorbeeld voor het ondergronds uitwisselen van energie. Naast het terrein ligt een warmtestrook van de WKO en ca. 120 meter verder aan de andere kant van het terrein een koude-strook. In de omgeving herhalen de warmte- en koude-strook zich zodat de bronnen kunnen clusteren.

Naast het Sciencepark bevindt zich het datacenter Equinix, een Amerikaans datacentrum. Dit datacentrum heeft het hele jaar door koelvraag, omdat het draaien van de computers veel warmte creëert. Het bedrijf wil continu koeling hebben, waardoor de wens ontstond een combinatie met het

WKO-systeem van het Sciencepark UvA te maken. Het datacentrum wilde echter geen fysieke verbinding maken met de bronnen van de UvA via een rechtstreekse leiding. Ze wilden het risico niet nemen dat de koeling van hun gebouw in gevaar komt bij een leidingbreuk bij een andere partij. Een datacentrum heeft veel restwarmte over, welke gebruikt kan worden voor de gebouwen van de UvA met een warmtevraag. Het benutten van de overtollige warmte-energie van het datacentrum is een kans voor de UvA voor het vergroten van het aandeel duurzame energie in de totale energiehuishouding.

Om toch deze energie van elkaar te kunnen benutten is er een eenvoudige oplossing gekozen. De warmtebronnen van het datacentrum en de UvA zijn bij elkaar gepositioneerd en de koude bronnen zijn ook bij elkaar gepositioneerd. Alle warmte van beide complexen worden in dezelfde bel geïnjecteerd. Hierdoor ontstaat er een collectieve ondergrondse warmtebron. De warmte wordt dus thermisch ondergronds gedeeld. Tussen de UvA en Equinix is een convenant opgesteld. Hierin staat dat ze gezamenlijk de vergunning en bronnen in stand houden (Siemes, 2017).

In Bijlage 1.5 Gegevens Science Park UvA is te zien hoeveel energie het WKO-systeem van de UvA met behulp van het datacenter in 2011 levert (van Donselaar, 2012). In Figuur 41 is de geleverde warmte en koude in 2011 van het WKO-systeem grafisch weergegeven.



Figuur 41: Warmte en koude levering WKO-systeem Science Park UvA (thermisch verbonden systeem)

3.8 Samenvatting

In dit hoofdstuk zijn verschillende praktijksituaties, van zowel individuele als collectieve WKO-systemen, in Nederland beschreven. In deze paragraaf worden de meest opvallende bevindingen samengevat.

Ontwerpwaarden en gerealiseerde waarden

Uit alle onderzochte projecten blijkt dat de ontwerpwaarden en gerealiseerde waarden verschillen. In de ontwerpen zitten vaak hogere waarden. De (licht) tegenvallende resultaten in de praktijk worden verklaard door:

- gebouwen die minder hebben afgenomen van het WKO-systeem dan ze zouden moeten doen op grond van de ontwerpwaarden
- schommelingen in de jaarlijkse behoefte waardoor een energiebalans moeilijk te vinden is, dit geldt met name voor scholen
- klimatologische invloeden: schommelingen in warmte en koude in gelijke seizoenen, wat vervolgens weer impact heeft op het laden van warmte of koude bij de WKO
- Steeds veranderende samenstelling van gebouwen/complexen (bij uitbreiding van het systeem) waardoor (zeker bij collectieve systemen) telkens weer een nieuwe balans moet worden gevonden.

Opvallend is dat de aangeleverde gegevens van de onderzochte projecten vaak sterk van niveau, meetmomenten en resultaten verschillen. Dit maakt onderlinge vergelijking lastig.

Functiegebouw en type energievraag

Uit ervaringen blijkt dat de gebouwen met verschillende functies een andere warmte- en koude-vraag hebben. In Tabel 11 is, op basis van de behandelde praktijkcases en interviews, met een min of een plus aangegeven of een type gebouw voornamelijk warmte- en/of koude-vraag heeft gedurende het jaar. Uit de ervaringen is gebleken dat er kantoren zijn die een grotere warmtevraag hebben dan een koude-vraag en dat er kantoren kunnen zijn waarbij dit andersom is. Dit komt door het type kantoor. Bij het ene kantoor worden grote computerinstallaties gebruikt, waardoor er eerder een koude-vraag is en bij een ander kantoor wordt er met laptops gewerkt (warmtevraag). Scholen en universiteiten hebben alleen een verschil in de koude-vraag, omdat scholen in de zomer gesloten zijn en universiteiten open.

Tabel 11: Verschillen in warmte- en koude-vraag per type gebouw

Type gebouw	Warmtevraag	Koude vraag
Kantoor i (warmtevraag)	+	-
Kantoor ii (koude vraag)	-	+
Middelbare school	+	-
Universiteit	+	+
Woning	++	+
Data center	--	+++
Laboratorium	-	++
Sportcentrum	+	-
Zwembad	+++	--

Toelichting: -- = nauwelijks, - = matig, + = veel, ++ = heel veel, +++, extreem

Beheer van individuele en collectieve systemen : aanloopproblemen

Uit de onderzochte projecten blijkt dat gedurende de eerste jaren er vaak sprake is van aanloopproblemen. Dit vanwege een matige afstemming tussen de energiecentrale en gebouwinstallaties. Blijkbaar moet ervaring worden opgedaan met opstarten, inregelen en fine-tunen van systemen voordat de gewenste energiebalansen worden bereikt. Ook blijkt dat bij een veranderende samenstelling van gebouwen/complexen (bijvoorbeeld bij uitbreiding van het systeem), opnieuw (zeker bij collectieve systemen) weer een balans moet worden gevonden. De aansturing van de systemen levert na de aanloopfase vaak minder problemen op.

Daarnaast komt het in deze aanloopfase vaak voor dat er nog geen warmte in bodem zit. De bodem moet nog met warmte worden 'geladen'. Daardoor is de thermisch balans in het begin nog niet goed.

Beheer van collectieve systemen: aansturing

Er is sprake van verschillen tussen individuele en collectieve systemen voor wat betreft de aansturing. Individuele systemen zijn veelal gebonden aan één gebouw. Dat maakt aansturing en beheer eenvoudig. Bij collectieve systemen ligt dit complexer. Meestal ligt het beheer van het collectieve systeem in één hand, maar zijn er meerdere gebruikers, met ieder hun eigen wensen. Er moet dan een goede afstemming plaatsvinden tussen de ene beheerder en de gebruikers.

Bij collectieve systemen zijn de energiewinsten vaak groot, zeker wanneer de aanloopproblemen zijn overwonnen. WKO-systemen kunnen volgens de ervaringen op twee manieren verbonden worden tot collectieve systemen, namelijk met een ringleiding (twee- of vier-pijp aansluiting) of thermisch. Deze drie varianten worden in hoofdstuk 4 behandeld.

Checklist

Op basis van deze praktijkervaring kan geconcludeerd worden dat drie criteria van belang zijn bij het functioneren van WKO-systemen:

- ontwerpwaarden en gerealiseerde waarden
- functiegebouw en de daarmee samen hangende type energievraag
- Beheer van individuele en collectieve systemen.

4. Koppelen van WKO-systemen

4.1 Inleiding

De werking van de drie typen open WKO-systemen en de ervaringen bij deze WKO-systemen zijn in de voorgaande hoofdstukken besproken. Uit hoofdstuk 3 komt naar voren dat er al collectieve WKO-systemen bestaan. In dit hoofdstuk wordt er onderzocht hoe verschillende typen open WKO-systemen gekoppeld kunnen worden en op welke manieren deze verbindingen gelegd kunnen worden.

In paragraaf 4.2 wordt beschreven óf en hoe de drie typen open WKO-systemen met elkaar gekoppeld kunnen worden. Eerst wordt er gekeken naar het verbinden van monobronnen met doubletbronnen. Hierna wordt beschreven of het gunstig is om recirculatiesystemen met mono- of doubletbronnen te koppelen. Bij deze verkenningen wordt ook ingegaan op voor- en nadelen.

In paragraaf 4.3 wordt besproken op welke onderdelen van een WKO-systeem er gekoppeld kan worden. Aan de orde komen ringleidingen volgens het twee-pijps- en het vier-pijpsysteem (paragraaf 4.3.1), individuele warmtepompen en collectieve warmtepompen (paragraaf 4.3.2). In deze paragrafen wordt ingegaan op voor- en nadelen van de verschillende typen. In paragraaf 4.3.3 wordt de thermisch verbinding toegelicht. Het hoofdstuk wordt afgesloten met een samenvatting.

De volgende deelvragen in het onderzoek worden beantwoord:

- *Welke varianten van WKO-systemen kunnen met elkaar gekoppeld worden?* (deelvraag 3)
- *Op welke onderdelen van een WKO-systeem kan er met een ander WKO-systeem een koppeling worden gemaakt?* (deelvraag 4).

4.2 Het koppelen van WKO varianten

Op basis van de conclusies uit de voorgaande hoofdstukken is het duidelijk geworden, met name op basis van de ervaringen bij universiteiten, dat er koppelmogelijkheden zijn voor individuele WKO-systemen die kunnen leiden tot het verbeteren van het duurzame energierendement. In deze paragraaf wordt beschreven óf en hoe de drie onderscheiden typen open WKO-systemen met elkaar gecombineerd kunnen worden en wat hiervoor de voorwaarden zijn. Eerst wordt de koppeling tussen mono- en doubletsystemen behandeld, vervolgens de koppeling van een recirculatiesysteem met een mono- of een doubletsysteem.

4.2.1 Koppeling mono- en doubletsysteem³

Mono- en doubletsystemen kunnen met leidingen of thermisch met elkaar verbonden worden onder de volgende voorwaarden:

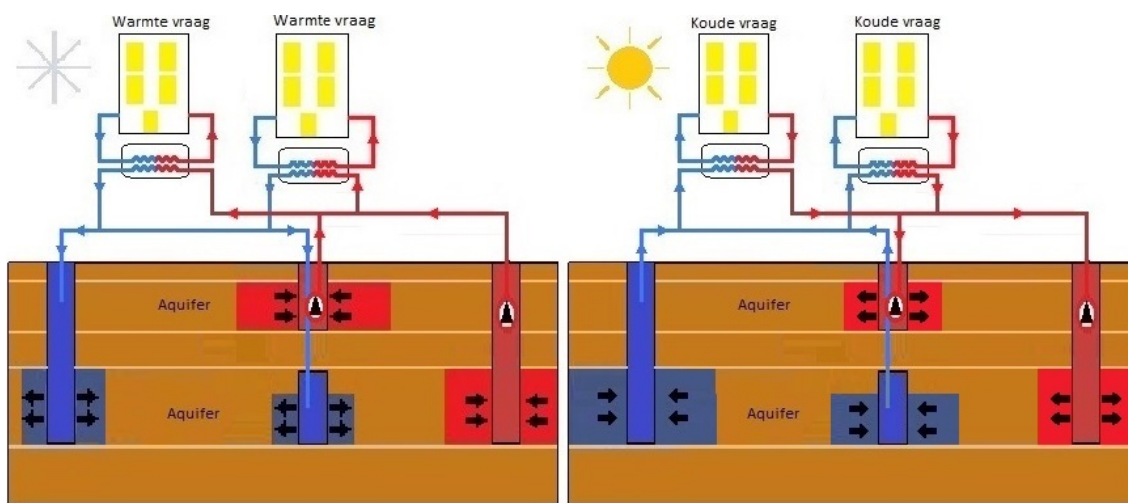
1. De positionering van de bronnen is zodanig dat de gekoppelde systemen elkaar niet belemmeren (technisch)
2. Het totale energierendement (veranderingen ΔT /pompcapaciteit) is positief (technisch)

³ Zowel de mono- als de doubletsystemen kunnen ook met elkaar worden gekoppeld. Daarvoor gelden dezelfde principes als in deze sub paragraaf word beschreven.

3. De aanwezigheid van meerdere partijen met een complementaire energievraag in een gebied (organisatorisch).

Ad. 1: positionering bronnen

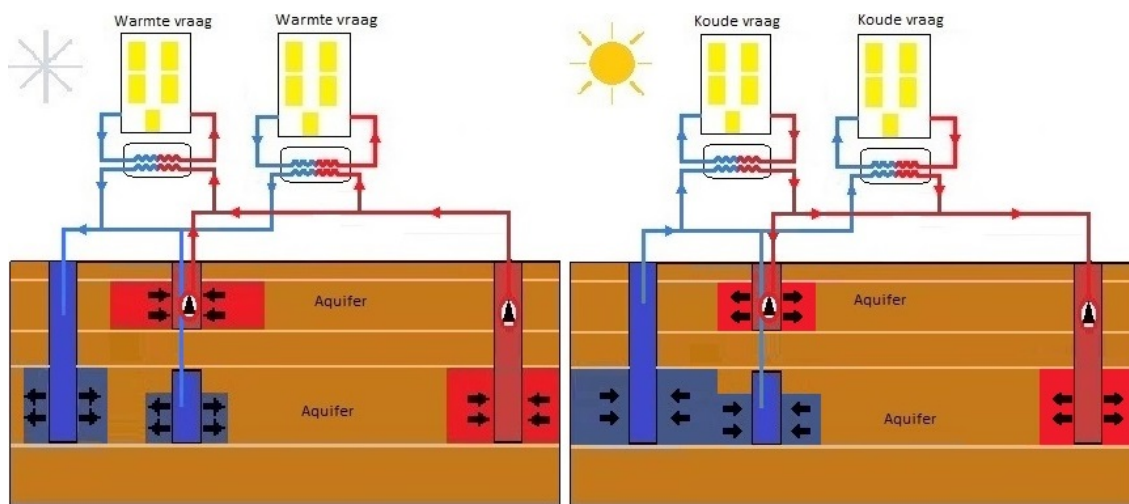
In Figuur 42 en Figuur 43 zijn de verbindingsprincipes van een monosysteem en een doubletsysteem weergegeven. Bij het koppelen van een mono- met een doubletsysteem mogen de systemen elkaar niet belemmeren. Een monobron kan het beste tussen de warmte en koude bellen geplaatst worden van een doublet of boven in het watervoerend pakket. Figuur 42 laat dit zien. De monobron staat in contact met de doubletbron en heeft door deze positionering geen negatieve invloed op de warmte en koude bellen van het doublet (van Beek, et al., 2012). De positionering van de bronnen in afstand (horizontaal) en hoogte ten opzichte van elkaar (verticaal) is van invloed: zie paragraaf 2.5.8.



Figuur 42: Koppeling mono met doublet, met monobron tussen de doubletbellen.

De warmte- en koude-bronnen van de monosystemen kunnen ook andersom ten opzichte van elkaar gepositioneerd worden. Zie voor uitleg paragraaf 2.4.1.

Bij andere optie, in Figuur 43, is het onderste filter van de monobron in een warmte of koude bel van een doublet gepositioneerd. De onderste bel van de monobron moet dan wel hetzelfde type bel zijn als die van het doublet. De bovenste bel van de monobron mag niet in aanraking komen met de bellen. In deze variant ontstaat er positieve interferentie. Het enige nadeel is dat de systemen deels hetzelfde grondwater onttrekken, wanneer de putten te dicht bij elkaar worden geplaatst (minder dan 10 meter). Dan kan de totale onttrekkingscapaciteit zijn kleiner ten opzichte van de eerste optie. In dichtbebouwde gebieden is deze variant een goede optie (van Beek, et al., 2012).



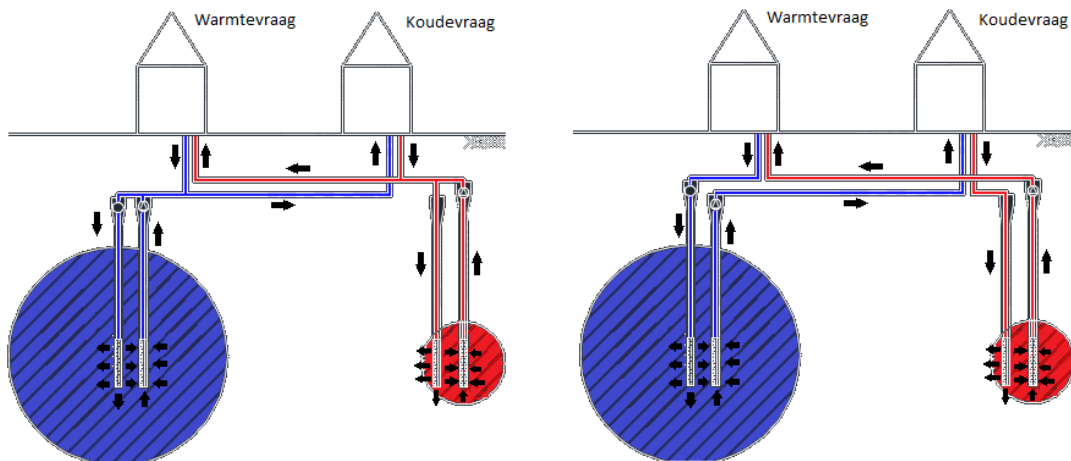
Figuur 43: Koppeling mono met doublet, met koude interferentie van bellen

Ad. 2: totale energierendement

Wanneer een bestaand systeem wordt aangesloten op een ander systeem zullen de ΔT 's van de afzonderlijke WKO-systemen veranderen, waardoor er voor het hele gekoppelde WKO-systeem uiteindelijk één ΔT ontstaat. De ΔT van een bestaand systeem zal hoger of lager worden als gevolg van de koppeling. Verandering van ΔT heeft gevolgen voor het benodigde grondwater en de m^3 /uur aan pompcapaciteit. De waterbehoefte en pompcapaciteit worden lager bij een hogere ΔT , en hoger bij een lagere ΔT . Voorwaarde voor een koppeling met het oog op energierendement voor het totale systeem is dat de balans van het totale (duurzame) energiegebruik positief moet zijn, en de pompcapaciteit niet onevenredig toeneemt. De verandering van de dT en de verandering in het benodigde pompcapaciteit in beide systemen, moet voor het totale energiegebruik (kWh) positief zijn.

Ad 3: aanwezigheid van meerdere partijen met een complementaire energievraag in een gebied

Een voorwaarde voor een succesvolle koppeling met andere WKO-systemen is de aanwezigheid van meerdere partijen met een complementaire energievraag in een gebied. Wanneer er een gebouw is dat enkel warmtevraag heeft, is de warmte bel van een doublet of mono niet of nauwelijks geladen. Er is dan in de koude bel een koude-overschot. Door een extra onttrekkingsbron te positioneren in de koude bel van het WKO-systeem en vervolgens het koude grondwater te onttrekken voor koeling van een gebouw dat alleen maar koude-vraag heeft, zal het koude-overschot al verminderen. De warmte die het gebouw met de koude-vraag dan afgeeft moet vervolgens geïnjecteerd worden in de warmte bel van het WKO-systeem. Dit kan weer via de twee hierboven genoemde manieren. Het WKO-systeem komt dan na verloop van tijd weer in balans (den Dekker, 2017). In Figuur 44 dit principe geïllustreerd.



Figuur 44: Doubletten gekoppeld op retourleiding en doubletten thermisch gekoppeld

Toelichting: Links de situatie waarin de doubletten gekoppeld worden via een retourleiding, rechts de situatie waarin de doubletten thermisch worden gekoppeld.

Voor- en nadelen om mono- of doubletsystemen met mono- of doubletsystemen te koppelen

Voordelen:

- een monosysteem kan tussen een doubletsysteem geplaatst worden, zonder dat het negatieve interferentie veroorzaakt
- positieve interferentie mogelijk door clustering van bronnen van gelijke temperatuur
- toevoeging van een monosysteem aan een doubletsysteem kan een oplossing zijn voor het uitbreiden van WKO capaciteit wanneer de ruimte in de ondergrond beperkt is
- Bereiken van een balans die bij individuele WKO-systemen niet aanwezig zijn.

Nadeel:

- De koppeling kan alleen toegepast worden bij een aquifer van voldoende omvang.

4.2.2 Koppeling recirculatie- met mono- of doubletsysteem

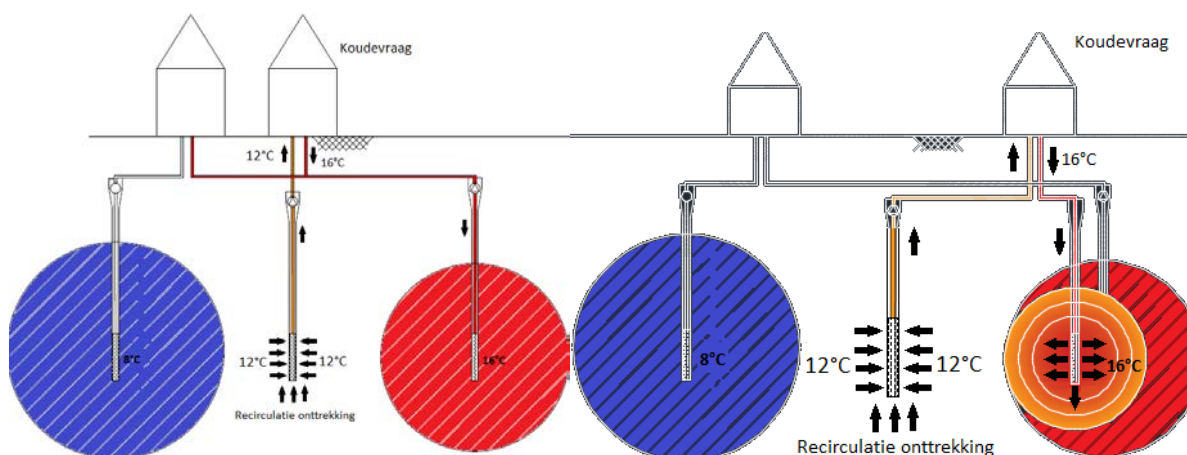
Recirculatiesystemen kunnen met mono- of doubletsystemen met leidingen of thermisch met elkaar verbonden worden onder de volgende voorwaarden:

1. Positionering van de bronnen is zodanig dat de gekoppelde systemen elkaar niet belemmeren (technisch)
2. Het totale energierendement (veranderingen ΔT /pompcapaciteit) is positief (technisch)
3. De aanwezigheid van meerdere partijen met een complementaire energievraag in een gebied (organisatorisch).

Daarmee zijn deze voorwaarden gelijk aan de voorwaarden van het koppelen van mono- en doubletsystemen.

Ad. 1: positionering bronnen

Een recirculatiesysteem kan in principe gekoppeld worden met een mono- of doubletsysteem. Er zijn twee varianten, namelijk een koppeling met een retourleiding en thermische koppeling. In Figuur 45 is dit weergegeven.



Figuur 45: Recirculatie gekoppeld op retourleiding en recirculatie thermisch gekoppeld

Toelichting: Links de situatie waarin de recirculatie gekoppeld is via een retourleiding, rechts de situatie waarin de recirculatie thermisch is gekoppeld.

Deze vorm van koppeling kan worden toegepast wanneer er een onbalans tussen koude en warmte bronnen is. De onttrekkingsbron moet zo gepositioneerd zijn dat alleen de natuurlijke bodemtemperatuur van invloed is: de bronnen van de mono- of doubletsystemen mogen niet te dicht bij de onttrekkingsbron van het recirculatiesysteem liggen. Een uitzondering op dit principe is de situatie wanneer de onttrekkingsbron uit het recirculatiesysteem wordt gebruikt om een onbalans tussen een warmte en koude bron op te heffen (zie hierna onder Ad. 3). Voor deze vorm van koppeling tussen een recirculatiesysteem en een mono- of doubletsysteem kan worden gekozen wanneer er reeds een recirculatiesysteem in een gebied aanwezig is. Daarbij mag het thermisch invloedgebied niet te groot worden.

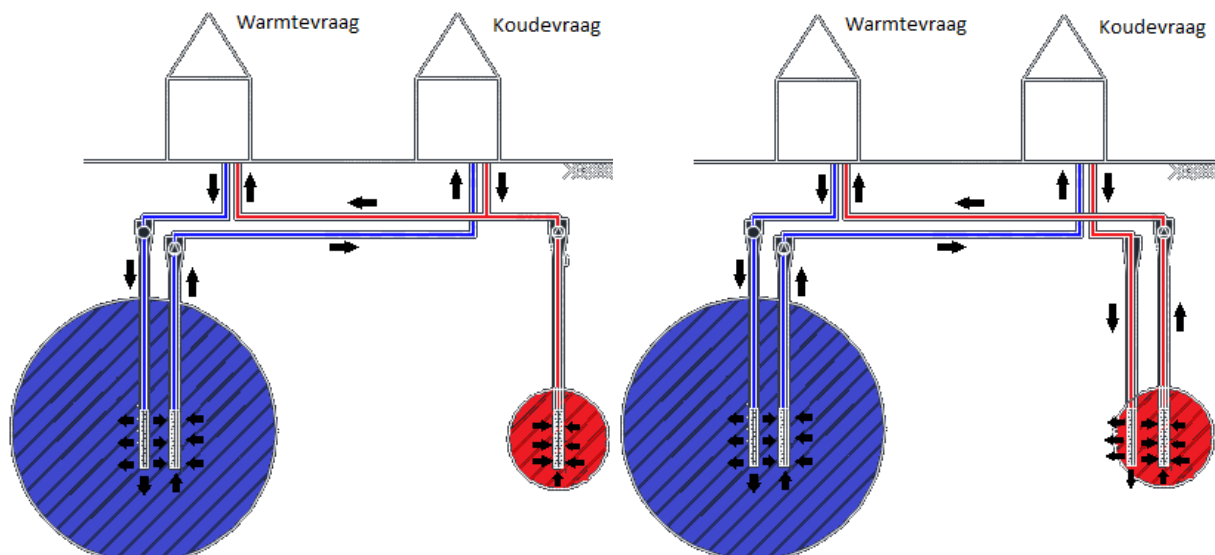
Ad. 2: totale energierendement

Een recirculatiesysteem gebruikt de natuurlijke bodemtemperatuur. Hierdoor is het energierendement lager dan bij mono- of doubletsystemen. De onttrekkingsleiding van een recirculatiesysteem staat alleen in fysieke verbinding met een gebouw en levert op deze manier laagwaardige warmte of koude (12°C). De warmte (ca. 16°C) of koude (ca. 8°C) die van het gebouw komt bevat meer energie. Deze warmte en koude kunnen gebruikt worden voor het versterken van warmte en koude mono- of doubletbronnen. Bij koppeling aan een mono- of doubletsysteem wordt de warmte of koude via een retourleiding op de leiding van de mono of doublet geloosd en geïnjecteerd in de bronnen (zie links in Figuur 45). Een andere manier is om via een extra bron de warmte of koude te injecteren in de juiste bel (zie rechts in de figuur).

Het energierendement van deze koppeling is daarmee relatief laag, in vergelijking met gekoppelde mono- en doubletsystemen, maar kan wel positief zijn.

Ad 3: aanwezigheid van meerdere partijen met een complementaire energievraag in een gebied

Wanneer er meerdere partijen met een complementaire energievraag in een gebied zijn en er overschotten zijn ontstaan, kan koppelen van een recirculatiesysteem met een mono- of doubletsysteem het energierendement vergroten. Hier geldt daarmee het zelfde principe als bij de koppeling van mono- en doubletsystemen (zie paragraaf 4.2.1). In Figuur 46 is dit principe geïllustreerd.



Figuur 46: Recirculatiesysteem onttrekt uit een overschot

Toelichting: Een extra onttrekkingsbron zorgt voor de nog niet ingevulde behoefte met WKO en voor een betere balans. Met links een koppeling op leidingen en rechts een thermische verbinding.

Voor- en nadelen om recirculatiesystemen met andere open WKO-systemen te koppelen

Voordelen:

- wanneer er een onbalans in het gebied is kan er een recirculatiesysteem geplaatst worden om een evenwicht te creëren
- Er is, wanneer de onttrekkingsbron niet in thermische invloedgebieden ligt, altijd een temperatuur van ca. 12°C die onttrokken kan worden en met een warmtepomp gebruikt kan worden voor extra koeling of verwarming.

Nadelen:

- de onttrekking van de natuurlijke bodemtemperatuur is ongunstig voor directe uitwisseling met mono of doubletbronnen
- wanneer er water met een temperatuur van 12°C onttrokken wordt, zal er (door de kleinere ΔT) meer energie in de warmtepomp gestopt moeten worden om de gewenste temperatuur te behalen
- De positie van de onttrekkingsbron bij een recirculatiesysteem moet zo gepositioneerd zijn dat er uit het onttrekkingsgebied maar één type warmte onttrokken wordt (namelijk, 12°C, warmte of koude).

4.3 Koppeling op onderdelen van WKO-systemen

4.3.1 Ringleidingen

Om individuele WKO-systemen fysiek te verbinden moet er een ringleiding tussen de WKO-bronnen geplaatst worden. Deze ringleiding bestaat uit twee leidingen, namelijk een leiding voor warmte en een leiding voor koude transport. Op deze wijze kunnen warmte en koude tussen WKO-bronnen beter uitgewisseld worden. Daardoor worden overschotten en tekorten aan energie beter verdeeld.

Warmte of koude kan via deze leiding van een gebouw weer in de juiste bron worden geïnjecteerd, zodat bellen van de WKO-bronnen in een goed evenwicht blijven (Hoogervorst, 2009).

Wanneer er een verbinding wordt gemaakt met een ringleiding tussen meerdere WKO-bronnen moet er rekening gehouden worden met dynamische druk. Een ringleiding moet onder druk staan en deze druk moet worden gehandhaafd. De dynamische druk in een ringleiding moet rond de 2,5 bar liggen. Deze druk zal dalen wanneer een gebouw een vraag krijgt naar warmte of koude. Om de druk te handhaven, komt er een pomp-opgave uit het WKO-systeem bij. De warmte of koude die van het gebouw terug komt weer in de andere ringleiding terecht. Hierdoor stijgt de druk in deze ringleiding. Om te zorgen dat de druk rond de 2,5 bar blijft liggen, zal er een injectiebron open gaan zodat het

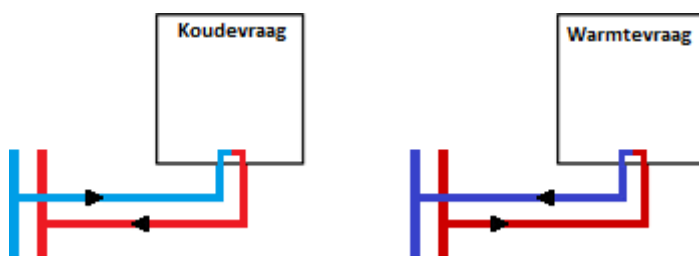
Wanneer de WKO-bronnen niet verspreid over de ringleidingen liggen of wanneer de transportafstand tussen bron en gebruiker te groot is dan zal de druk in de ringleiding dalen. Daardoor gaat het water trager stromen en moet er meer pompcapaciteit komen.

Wanneer de bestaande WKO-systemen worden gekoppeld op een collectieve WKO-systeem hebben de verschillende pompcapaciteiten in principe geen invloed. De ringleidingen van het collectieve WKO-systeem worden ontworpen op de maximale pompcapaciteit van het systeem. De ringleidingen moeten tegen deze weerstand kunnen en zullen altijd op een bepaalde druk (ca. 2,5 bar) gehouden worden (zie TU Eindhoven paragraaf 3.6.2). Wanneer er een gebouw een behoefte krijgt zal er een pomp aanslaan die deze behoefte in gaat vullen. Wanneer meerdere gebouwen gelijktijdig warmte- of koude-behoefte hebben en deze niet ingevuld kan worden met één pomp zal/zullen er een andere(n) pomp(en) aanslaan. Bij een collectief WKO-systeem moet de totale pompcapaciteit van alle warmte- en de koude-bronnen gelijk aan elkaar zijn.

In paragraaf 3.6.1 en 3.6.2 is al kort het leidingennet van de Radboud Universiteit respectievelijk de ringleiding van de TU Eindhoven besproken. Het verschil tussen deze twee verbidingsnetwerken is dat er bij de Radboud Universiteit met twee leidingen is gewerkt (twee-pijpsysteem). Bij de TU Eindhoven zijn vier leidingen toegepast (vier-pijpsysteem). Dit betreft de wijze waarop de gebouwen zijn aangesloten op de ringleiding, met twee of vier pijpen. Beide types ringleidingen worden hieronder beschreven.

Twee-pijpsysteem

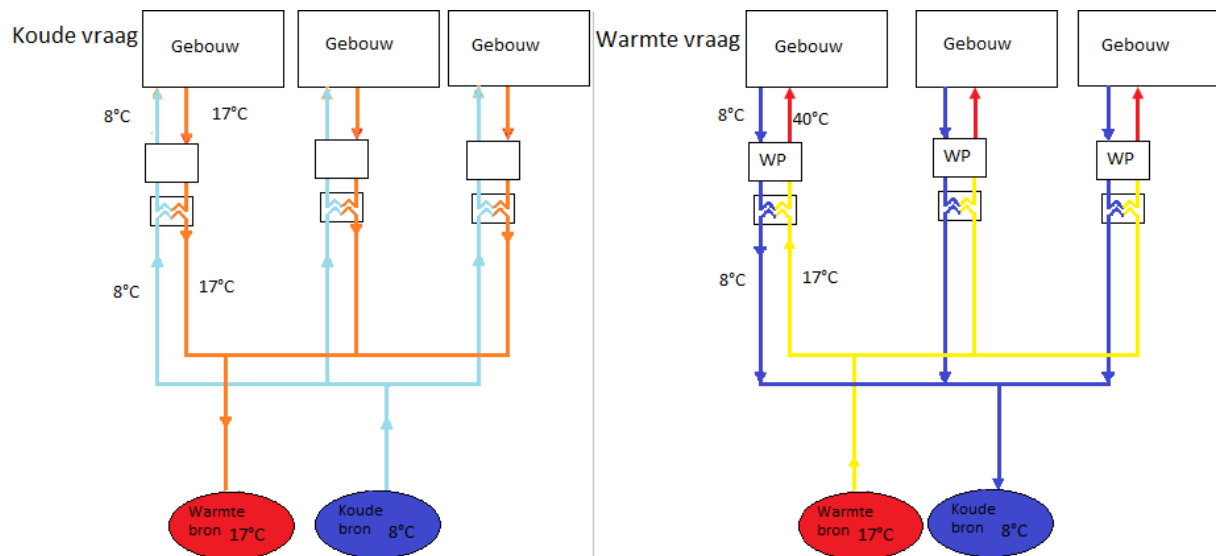
Een twee-pijpsysteem bestaat uit een aanvoer- en een retourleiding voor warmte en koude transport naar het gebouw (zie Figuur 47). Alle gebouwen die op deze wijze zijn aangesloten, kunnen alleen koelen of verwarmen.



Figuur 47: Principe van twee-pijpsysteem

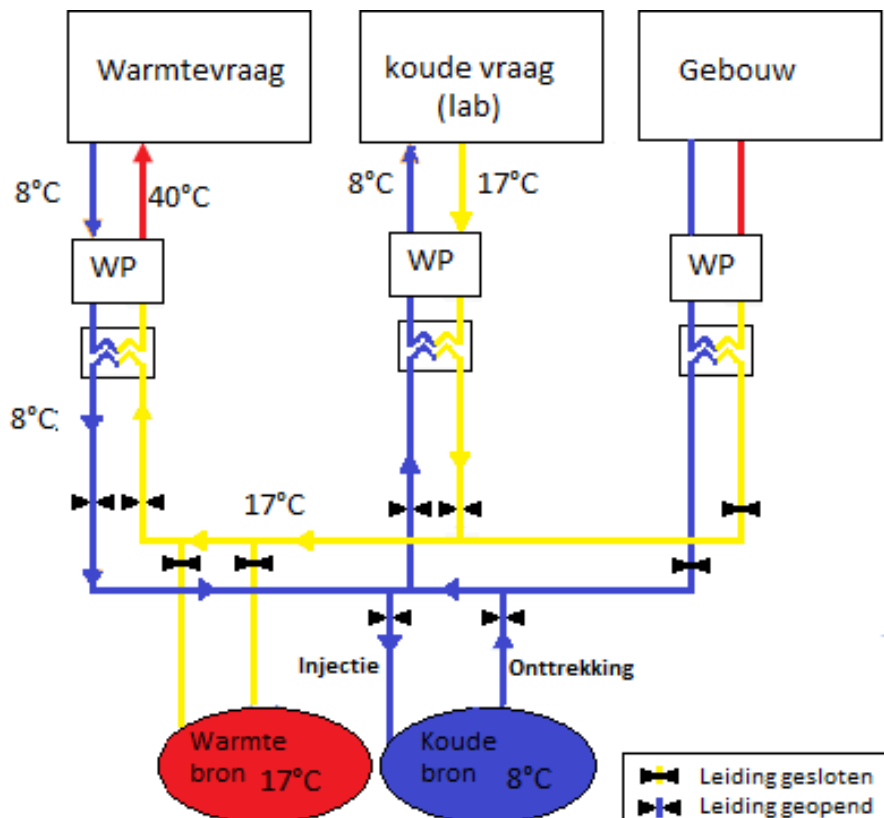
Toelichting: het linker gebouw heeft een koude vraag en het rechter gebouw een warmtevraag.

Met een twee-pijpsysteem kan er onderling (tussen gebouwen) ook warmte en koude uitgewisseld worden, zonder gebruik te maken van de WKO-bronnen. Het water wordt niet geïnjecteerd in de bodem maar direct getransporteerd naar een ander gebouw. Dit geeft een besparing op de hoeveelheid water die onttrokken mag worden (Buiting, 2017). In Figuur 48 is het volledige principe van een twee-pijpsysteem weergegeven en in Figuur 49 het principe van de uitwisseling met twee leidingen. Het gebouw heeft een koude vraag (bijvoorbeeld een laboratorium) en onttrekt uit de koude WKO-bron. Vervolgens wordt de warmte die van het lab koud gelijk door getransporteerd naar een gebouw die een warmtevraag heeft. De koude die van het gebouw komt wordt weer geïnjecteerd in een koude WKO-bron.



Figuur 48: Principe van een collectief WKO-systeem met één aanvoer- en retourleiding

Toelichting: in de linker figuur is de koude stroom naar de gebouwen weergegeven (lichtblauw) en de warmte retour naar de bron (oranje). In de rechter figuur is de warmte stroom naar de gebouwen weergegeven (geel) en de koude retour naar de bron (donkerblauw).

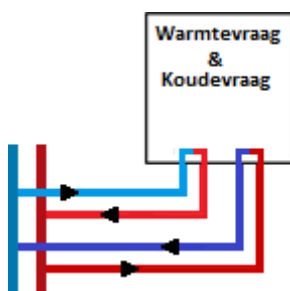


Figuur 49: Principe van warmte koude uitwisseling met twee leidingen

Toelichting: Bij uitwisseling van warmte en koude hoeft er niet eerst geïnjecteerd te worden. In het voorbeeld heeft het rechter gebouw geen vraag (de kleppen zijn gesloten).

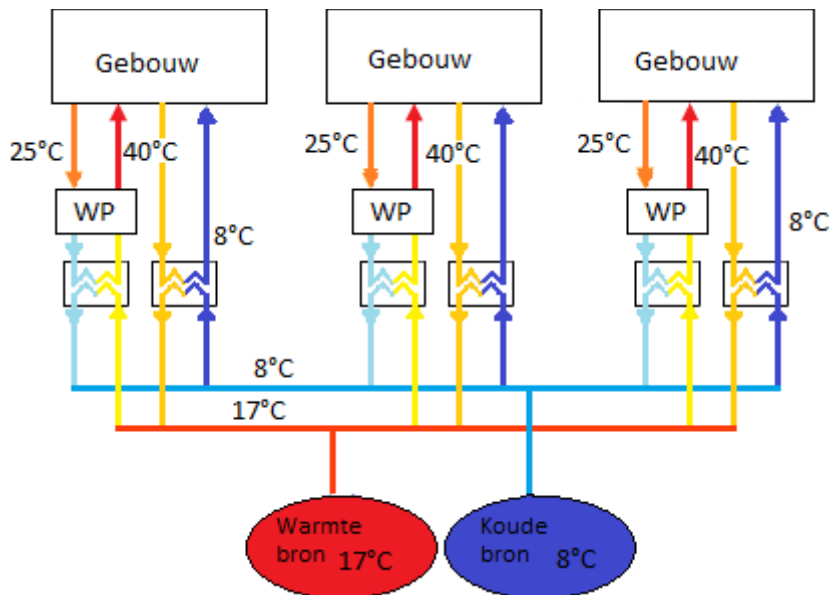
Vier-pijpsysteem

Een vier-pijpsysteem bestaat uit twee aanvoer- en twee retourleidingen (Figuur 50). Voor zowel warmte als koude is er een aparte aanvoer en retourleiding beschikbaar. Hiervoor heeft het gebouw wel twee warmtewisselaars nodig. Een gebouw kan gelijktijdig warmte en koude vragen uit het collectieve WKO-systeem. Een vier-pijpsysteem wordt daarmee aanbevolen voor een WKO-systeem met gebouwen die verschillende warmte- en koude-vraag hebben op hetzelfde moment. Er kan ook gelijktijdig direct warmte en koude gedeeld worden tussen gebouwen (zelfde principe als bij twee-pijpsysteem). Net als bij het twee-pijpsysteem bespaart dit ook op de hoeveelheid water die onttrokken mag worden. Bij dit systeem dient ook weer rekening gehouden te worden met de dynamische druk over de hele ringleiding.



Figuur 50: Principe van vier-pijpsysteem

Vergeleken met het twee-pijpsysteem moeten er bij een vier-pijpsysteem meer leidingen aangelegd worden. Dit is een grotere investering, maar voor gebouwen die een wens hebben naar zowel gelijktijdig warmte als koude is het erg gunstig. In Figuur 51 is een schematisch overzicht te zien van een collectief WKO-systeem met vier leidingen.



Figuur 51: Principe van een collectief WKO-systeem met twee aanvoer- en twee retourleidingen

Toelichting: voor principe warmtepomp zie paragraaf 2.5.2.

Voor- en nadelen van een ringleiding

Voordelen:

- het gelijktijdig en direct uitwisselen van warmte en koude tussen gebouwen, mits de druk gehandhaafd wordt
- besparing op onttrekking van grondwater is mogelijk
- doordat er warmte gedeeld kan worden is er een reductie op conventionele systemen (bijv. gasverbruik)
- de warmte- en koude-balans van het WKO-systeem is makkelijk te waarborgen, overschotten kunnen verspreid worden over de bronnen
- door een collectief WKO-systeem kan er bespaard worden op capaciteit van waterpompen, doordat de piekmoment per type gebouw verschillend is en er direct energie uitgewisseld kan worden
- Collectieve warmtepompen kunnen toegepast worden.

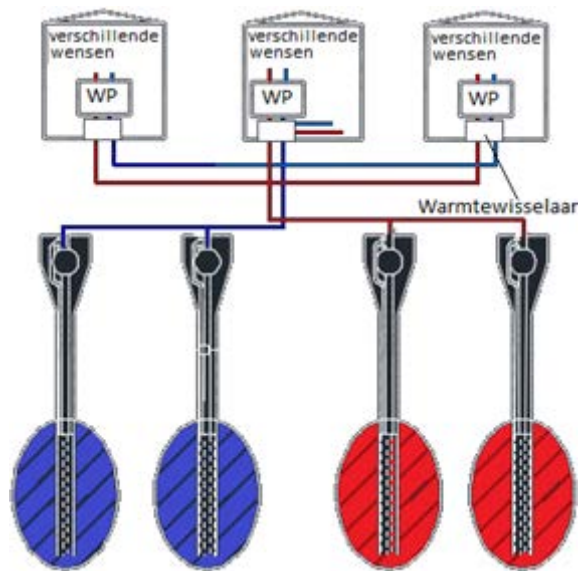
Nadelen:

- de ringleiding vraagt meer ruimte onder het maaiveld dan een individueel WKO
- Er is een beheerder nodig die het systeem onderhoudt en alle warmte- en koude-behoefes in het gebied coördineert, omdat het beheer complexer is.

4.3.2 Individuele en collectieve warmtepomp

Individuele warmtepomp

Bij een individuele warmtepomp heeft elke kantoor, woning, appartement etc. zijn eigen warmtepomp die gekoppeld is met een bron-systeem (Figuur 52). De onttrekking van warmte en koude uit de bronnen is centraal geregeld. Vervolgens wordt het bronwater getransporteerd via een distributienet naar de individuele warmtepomp. Vervolgens verwarmt de individuele warmtepomp het water naar de gewenste temperatuur.

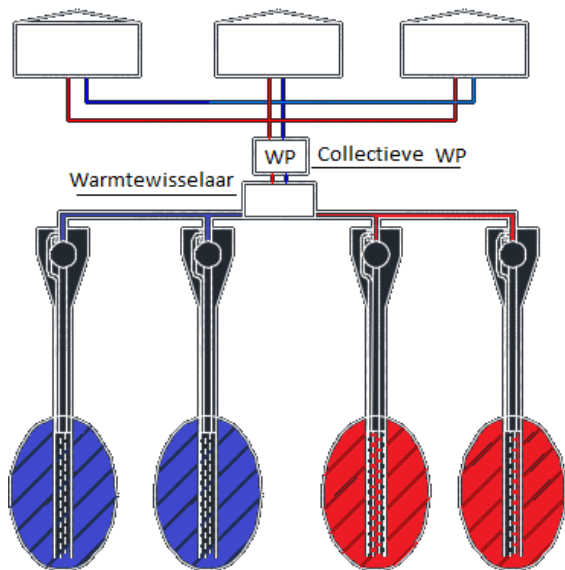


Figuur 52: Principe van een collectief WKO-systeem met individuele warmtepomp

Elke individuele gebruiker kan zelf bepalen of de warmtepomp wordt ingezet. Een individuele warmtepomp is vooral interessant als er veel gebruikers in een gebied zijn, die niet gelijktijdig dezelfde warmte of koude vraag hebben. Wanneer er veel woningen/gebouwen in een gebied zijn kan het interessant om een individuele warmtepompen toe te passen. Er treedt dan nauwelijks warmteverlies op, omdat de opgewekte warmte niet meer buitenshuis getransporteerd hoeft te worden. De warmtepomp is immers in pandig (Heijboer, 2012). Het toepassen van individuele warmtepompen kan voor onderhoud wel meer tijd en geld kosten. Bij een storing in één warmtepomp, hebben de andere gebruikers er geen last van.

Collectieve warmtepomp

Wanneer meerdere gebouwen/gebruikers één warmtepomp delen die in verbinding staat met een collectief WKO-systeem, spreekt men van een collectieve warmtepomp met een aan- en afvoerleiding (zie Figuur 53). De gebouwen hebben bij een collectief systeem een gemeenschappelijke leiding voor verwarming en koeling. Er hoeven minder leidingen aangelegd te worden dan bij individuele warmtepompen. Bovendien is er geen invloed van warmte en koude leidingen op elkaar (Geoholland, 2017). Het systeem is vooral interessant indien er veel gebouwen zijn die gelijktijdig dezelfde soort warmte- en koude-vraag hebben.



Figuur 53: Principe van een collectief WKO met collectieve warmtepomp

De collectieve warmtepomp kan op meerdere plekken staan in een collectief WKO-systeem. Het meest gunstig is als de warmtepomp dicht bij de gebouwen is geplaatst. Dan zal de warmte niet over een grote afstand van de collectieve warmtepomp naar de gebouwen getransporteerd hoeven te worden. De temperatuur, het isolatiemateriaal en de diameter van de isolatie van de leiding bepalen hoe groot het warmteverlies in de leidingen is. Wanneer het temperatuurverschil tussen het warme water en de omgeving groter wordt zal er een groter warmteverlies optreden. De collectieve warmtepomp transporteert water met temperaturen van 40 tot 50 °C. Transportafstand is daarmee een beperkende factor. Wanneer in de winter de buitentemperatuur laag is (zeg 5 °C), dan is er met een temperatuurtransportatie van 17 °C minder warmteverlies in vergelijking met een temperatuurtransportatie van 40 – 50 °C. Nu draagt het type isolatiemateriaal al heel veel bij aan het verminderen van warmteverlies, maar er zal altijd meer warmteverlies optreden (Hoogervorst, 2009).

Voor- en nadelen van de individuele en collectieve warmtepomp

De voor- en nadelen van individuele en collectieve warmtepompen zijn hierna weergegeven. De twee type warmtepompen zijn beide gunstig op verschillende gebieden. In Tabel 12 staan de positieve en negatieve punten van de systemen met plussen en minnen aangegeven.

Voordelen van een individuele warmtepomp:

- elke gebruiker kan de gewenste temperatuur krijgen, flexibele T
- het vermogen van deze kleine installaties is aangepast op de individuele behoefte en aanmerkelijk kleiner dan die van een collectieve warmtepomp
- er zijn geringe warmteverliezen in het distributienet, omdat het water met laagwaardige temperaturen wordt getransporteerd
- De storingsgevoeligheid is laag: bij een storing zit er maar één woning zonder warmte.

Nadelen van een individuele warmtepomp:

- er moeten meerdere toestellen worden geïnstalleerd
- er moeten meerdere warmtepompen aangesloten worden op het distributienet

- Er zijn meerdere warmtepompen in gebruik, waardoor er vaker onderhoud moet worden gepleegd.

Voordelen van collectieve warmtepomp:

- gebouwen met een gelijktijdige warmte- óf koude-vraag, hoeven maar één warmtepomp aan te schaffen
- er hoeft maar één warmtepomp geïnstalleerd te worden voor meerdere gebruikers
- Er hoeft maar één warmtepomp onderhouden te worden.

Nadelen van collectieve warmtepomp:

- wanneer er een storing is in de collectieve warmtepomp zitten alle aangesloten woningen en of gebouwen zonder gewenste temperatuur voor verwarming
- voor de individuele gebruiker is de temperatuurregeling beperkt
- Warmteverlies bij lange afstanden. Hoe groter de afstand van de warmtepomp tot de gebruiker, hoe groter het warmteverlies.

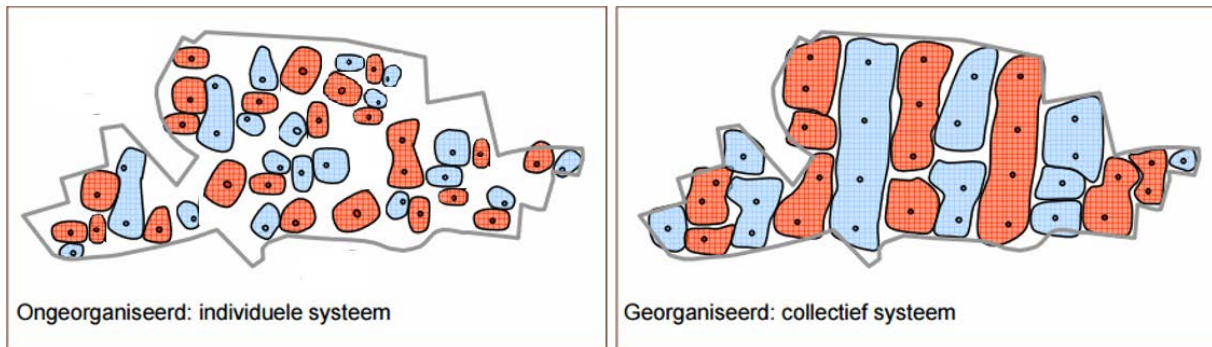
Tabel 12: Overzicht van voor- en nadelen per type warmtepomp

	<i>Individuele warmtepomp</i>	<i>Collectieve warmtepomp</i>
Warmteverlies binnenshuis	Weinig	Nauwelijks
Warmteverlies in distributieleiding	Nauwelijks	Weinig
Ruimtebeslag	Meer	Minder
Onderhoud	Meer	Minder
Storingsgevoeligheid	Kleiner	Groter
Gebouwen met dezelfde gelijktijdige behoeftes	Ongunstig	Gunstig
Gebouwen met verschillende behoeftes	Gunstig	Ongunstig
Flexibiliteit	Groter	Kleiner

4.3.3 Thermisch verbinden

Naast het fysiek verbinden van WKO-systemen met leidingen, kan er ook thermisch met bellen verbonden worden om een rendementsverbetering te bewerkstelligen. Bij thermisch verbinden delen gebouwen elkaars energie via bellen. De thermische verbinding blijkt organisatorisch het meest complexe collectieve systeem. Voor dit systeem wordt gekozen wanneer partijen wel de energiewinsten willen delen, maar het beheer van hun eigen WKO-systeem in eigen hand willen houden. Zo worden bedrijfsrisico's verminderd. In paragraaf 3.7.2 is er in de case van de Sciencepark UvA al geschreven over thermische verbindingen. Het thermisch verbinden wordt in de praktijk al veel toegepast en vraagt organisatorisch, op het niveau van beheer en gebruikers, afstemming met omliggende WKO-systemen.

In Figuur 54 is te zien dat WKO-systemen ongeorganiseerd en georganiseerd geplaatst kunnen worden. Wanneer WKO-systemen georganiseerd worden geplaatst zijn de condities voor positieve interferentie goed (Everts, et al., 2009). De WKO-bronnen hoeven echter niet per sé in warmte- en koude-stroken te staan. Clusters zijn ook een optie, zoals de TU Eindhoven laat zien (zie paragraaf 3.6.2).



Figuur 54: (On)georganiseerde aanleg van WKO-systemen

Toelichting: ongeorganiseerde (links) en georganiseerde (rechts) aanleg.

Bron: (Everts, et al., 2009)

Bronnen in een cluster die worden verbonden met leidingen kunnen ook thermisch verbonden zijn, geografische nabijheid speelt hier een rol. Thermisch verbinden is ook mogelijk in combinatie met een ringleiding.

Voor- en nadelen thermisch verbinden

Thermisch verbinden heeft een aantal voor- en nadelen.

Voordelen:

- gebruikers zijn niet van elkaar afhankelijk in het gebruik van installaties
- Gebruikers lopen minder risico's bij calamiteiten in de energievoorziening van andere gebruikers in het gebied.

Nadelen:

- het vraagt om meer afspraken tussen gebruikers in het gebied over de wijze van energie-uitwisseling
- Het direct uitwisselen van warmte en koude is lastiger, omdat het via infiltratie in de bodem verloopt.

4.4 Samenvatting

Het koppelen van WKO-systemen tot een collectief systeem heeft een aantal voordelen, maar ook beperkingen. Deze hebben zowel betrekking op de techniek als de organisatie. In Tabel 13 is een vergelijking gemaakt tussen individuele WKO-systemen en collectieve WKO-systemen op basis van de onderwerpen die in dit hoofdstuk aan bod zijn geweest.

Tabel 13: Vergelijking Individuele met collectieve WKO-systemen

	Individueel WKO-systeem	Collectief WKO-systeem	Toelichting
Eenvoudig te regelen voor vrager	++	+/-	Bij collectief systeem moet er één beheerder zijn die het systeem onderhoudt en precies weet wat de warmte en koude behoeftes van de gebouwen zijn.
WKO-bronnen in balans brengen	+/-	+	Bij individuele systemen komt al gauw voor dat er een overschot ontstaat in één van de bronnen. Bij collectief gebruik kunnen de warmte en koude evenwichtig gedeeld worden over het gehele systeem.
Energie delen	-	++	Bij collectieve systemen kan er direct warmte en koude uitgewisseld worden via leidingen. Bij individuele systemen worden warmte en koude alleen thermisch uitgewisseld, dit is in termen van energierendement niet altijd even gunstig.
Capaciteit effectief gebruiken	+/-	+	Collectieve systemen gebruiken dezelfde hoeveelheid water effectiever, omdat bij het uitgewisselde warmte en koude het grondwater niet in de bronnen wordt geïnjecteerd.
Conventionele systemen gebruiken	+	-	Voor individuele systemen worden nog veel conventionele systemen toegepast om de energie te leveren die het WKO-systeem tekort komt. Bij collectieve WKO-systemen is het gebruik van conventionele systemen aanmerkelijk minder. Hoe meer gebouwen op het collectief systeem aangesloten zijn, hoe hoger het rendement wordt.
Elektraverbruik	+/-	+	Collectieve systemen gebruiken over het algemeen meer elektrische energie, omdat deze meer in gebruik zijn dan de afzonderlijke individuele systemen. Het gasverbruik daalt wel (minder CO ₂ -uitstoot).

Toelichting: ‘-’ is ongunstig, ‘+/-’ is indifferent, ‘+’ is gunstig en ‘++’ is zeer gunstig.

Uit dit hoofdstuk blijkt dat in principe alle WKO-systemen aan elkaar gekoppeld kunnen worden tot een collectief systeem: mono-, doublet- en recirculatiesystemen.

Wanneer de bestaande systemen op het collectieve systeem worden aangesloten zullen de ΔT 's van de bestaande WKO-systemen na verloop van tijd veranderen. Deze stromen namelijk door dezelfde aanvoer- en retourleiding, waardoor er voor het hele WKO-systeem één ΔT ontstaat. Wanneer de bodem van een collectief WKO-systeem in onbalans is, maar de totale behoefte nog niet volledig wordt ingevuld met een WKO-systeem, zou een recirculatiesysteem relatief eenvoudig kunnen worden gebruikt voor het opheffen van een onbalans in de bodem. Voor het verbinden van de ringleiding met de gebouwen waar de warmte en koude-behoefte niet gelijktijdig optreden, kunnen twee-pijpsystemen worden toegepast.

Elke koppeling heeft wel voor- en nadelen. Wanneer er voor gekozen wordt een collectief systeem in te richten in een bepaald gebied zijn er meerdere variabelen van belang om te komen tot een optimale keuze. Een beslisboom hiervan is te vinden in Figuur 55. De variabelen zijn als volgt:

- De soort vraag van de gebruikers in het gebied:

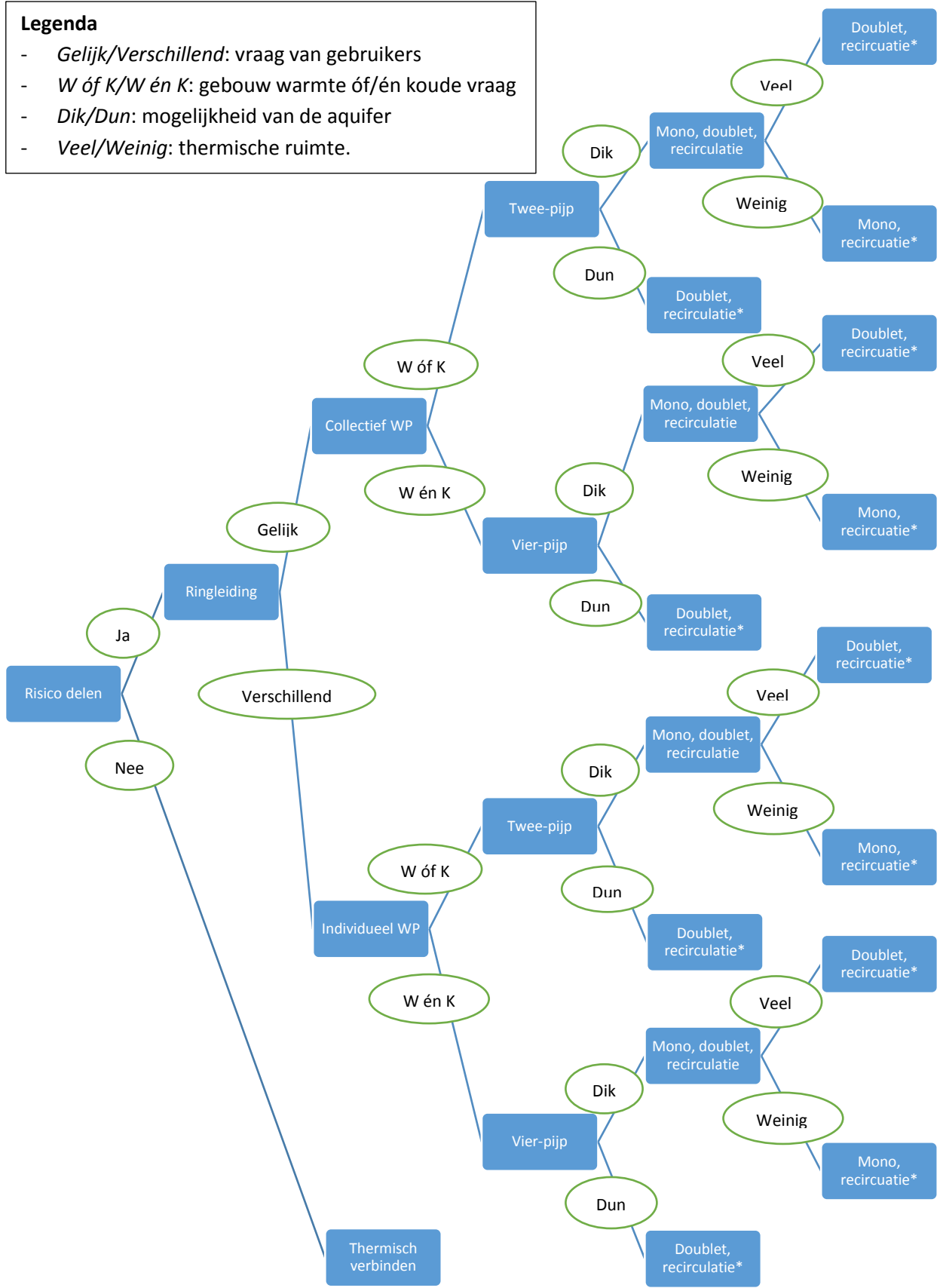
- a) Hebben de gebruikers gelijktijdig warmte- óf koude-vraag?
- b) Hebben de gebruikers gelijktijdig warmte- én koude-vraag?
- De opbouw van de ondergrond:
 - Welke mogelijkheden zijn er in de aquifer?
 - Is er genoeg 'thermische ruimte'? (in de breedte: hoeveelheid bronnen die in een gebied mogelijk zijn)
- De risico's die de gebruikers in het gebied willen delen:
 - In welke mate willen gebruikers risico's in hun eigen energievoorziening zelf kunnen beheersen?

Deze variabelen zijn niet van een zelfde 'orde' maar kunnen wel worden gebruikt om tot een 'keuzemenu' te komen. Een bepaalde combinatie levert een voorkeur voor een soort collectief WKO-systeem op. Hierna zijn een zestal voorkeurvarianten voor collectieve WKO-systemen op basis van deze variabelen aangegeven.

1. Gebruikers in het gebied hebben gelijktijdig warmte- of koude-vraag: *ringleiding met collectieve warmtepomp, twee-pijpsysteem*
2. Gebruikers in het gebied hebben gelijktijdig een warmte- én koude-vraag: *ringleiding met collectieve warmtepomp, vier-pijpsysteem*
3. Gebruikers in het gebied hebben gelijktijdig een verschillende warmte- of koude vraag: *ringleiding met individuele warmtepompen, twee-pijpsysteem*
4. Gebruikers in het gebied hebben gelijktijdig een verschillende warmte- én koude-vraag: *ringleiding met individuele warmtepompen, vier-pijpsysteem*
5. De opbouw van de ondergrond levert beperkingen op: (a) bij dunne aquifer: *doubletsysteem als aanvulling op bestaande systemen* en (b) er zijn al veel bronnen ('druk gebied'): *recirculatiesysteem of mono-systeem als aanvulling op bestaande systemen*
6. Een (aantal) gebruiker(s) in het gebied wil/willen de risico's in hun energievoorziening niet met andere gebruikers delen: *thermische verbinding*.

In de praktijk kunnen er binnen één gebied meerdere soorten gebruikersgroepen voorkomen (zie 1 tot en met 4 hierboven). Daardoor kan er binnen één gebied een combinatie van de varianten 1 tot en met 4 voorkomen. Er wordt dan bijvoorbeeld niet gewerkt met een collectieve OF individuele warmtepompen, maar met beide die wel in één collectief WKO-systeem voorkomen. Dit zal het geval zijn in een complex gebied met veel verschillende gebruikers. De casestudie Zuidas Noord is hier een mooi voorbeeld van. In het volgende hoofdstuk wordt voor dit complexe gebied een ontwerp gemaakt voor een collectief WKO-systeem. Daarbij wordt gewerkt vanuit de inzichten uit dit hoofdstuk.

- Legenda**
- *Gelijk/Verschillend*: vraag van gebruikers
 - *W óf K/W én K*: gebouw warmte óf/én koude vraag
 - *Dik/Dun*: mogelijkheid van de aquifer
 - *Veel/Weinig*: thermische ruimte.



Figuur 55: Keuzemenu in een vorm van een beslisboom

Toelichting:* Recirculatiesystemen worden in de praktijk niet veel toegepast en is voornamelijk gunstig wanneer er een onbalans in een bestaand WKO-systeem zit.

5. Casestudie Amsterdam Zuidas

5.1 Inleiding

In de voorgaande hoofdstukken is de theorie van de WKO besproken. Daarna zijn er een aantal cases in Nederland behandeld. Deze resultaten zijn in hoofdstuk 4 gebruikt om te kijken hoe WKO-systemen kunnen worden gekoppeld. In dit hoofdstuk wordt de casestudie Zuidas uitgewerkt. Deze uitwerking kan gezien worden als een stappenplan om te komen tot een afweging of verbinden van WKO-systemen tot een collectief systeem de energie-efficiëntie in een gebied kan vergroten. De opbouw van het hoofdstuk (en daarmee de te volgen stappen) is als volgt.

- Stap 1: *afbakenen van het gebied en typering van de gebouwen* (paragraaf 5.2).
- Stap 2: *uitgangspunten voor de berekeningen bepalen* (paragraaf 5.3).
- Stap 3: *berekenen van de energievraag van de gebouwen* (paragraaf 5.4).

In deze paragraaf wordt eerst de bestaande situatie beschreven en aangegeven welke gebouwen in de nabije toekomst (her)ontwikkeld gaan worden met een individueel WKO-systeem. Er wordt onderzocht wat de invulling van deze individuele WKO-systemen is op de behoeftes van de gebouwen.

- Stap 4: *uitwerken varianten: nul-variant en twee varianten voor koppeling* (paragraaf 5.5).
Vanuit de berekening in stap 3 kan een nul-situatie worden beschreven. Deze nul-variant is de berekening hoeveel warmte- en koude-behoefte er niet ingevuld kan worden met individuele WKO-systemen in de bestaande en (her)ontwikkelde gebouwen. Dan worden twee varianten ontwikkeld waarbij de bestaande en geplande gebouwen worden gekoppeld in een collectief WKO-systeem.
- Stap 5: *vergelijken van de varianten* (paragraaf 5.6).
- Stap 6: *samenvatting en oordeel: welke variant heeft de voorkeur?* (paragraaf 5.7).

Hiermee wordt deelvraag 5 beantwoord: *Op welke wijze kan de energie-efficiëntie in een gebied worden vergroot door het inrichten van een collectief WKO-systeem?*

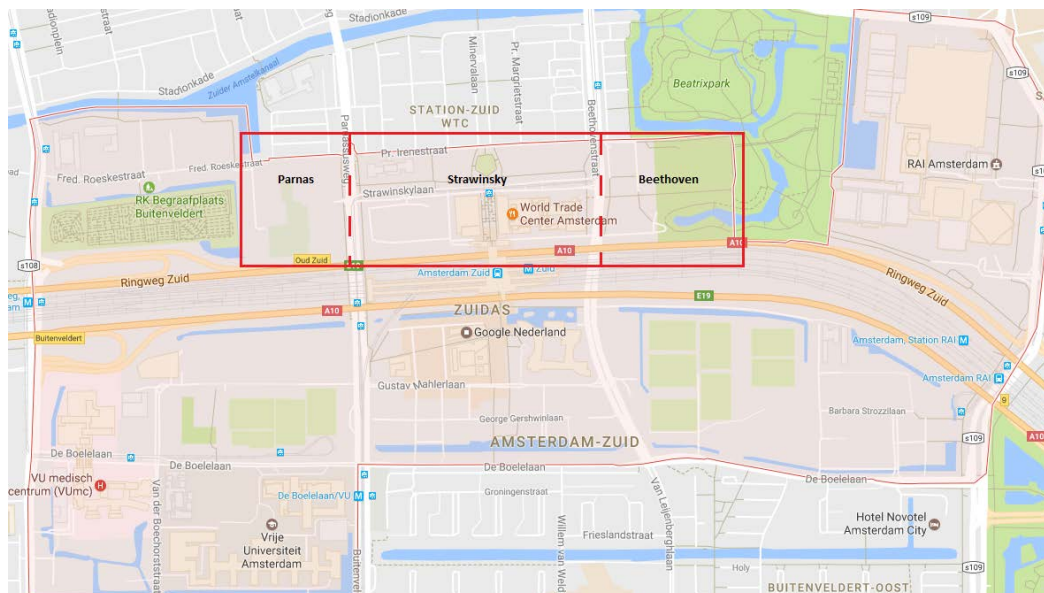
Hierna worden de zes stappen voor de casestudie Zuidas Noord achtereenvolgens besproken.

5.2 Stap 1: afbakening gebied en typering gebouwen

Deze casestudie gaat over de mogelijkheid om via koppeling van WKO-systemen in de Zuidas een grotere energie-efficiëntie te krijgen. Binnen het gebied van de Zuidas is gekozen voor de noordkant met de deelgebieden Parnas, Strawinsky en Beethoven, zie Figuur 56 voor de geografische afbakening. Er is specifiek voor dit gebied gekozen, omdat dit een dichtbebouwd gebied is met een mix van type gebouwen en daarmee warmte- en koude-behoeftes. In het gebied bevinden zich kantoren, scholen en woningen. Het gebied is niet ruimer gekozen, omdat er zich ten oosten en ten westen van het gebied geen bestaande of toekomstige (geplande) WKO-systemen bevinden. De zuidkant van het gebied wordt ook niet meegenomen, omdat de afstand met het onderzoeksgebied groot is en het lastig te verbinden is, vanwege de A10 die tussen de twee gebieden loopt.

In het gebied Zuidas Noord bevinden zich al bestaande gebouwen met WKO-systemen en zijn er herontwikkelingsplannen om gebouwen te verduurzamen. In Figuur 57 is een nadere detaillering van dit gebied te zien met de verschillende bestaande (Bordeauxrood) en geplande (groen) WKO-systemen voor de gebouwen. Het WTC, St. Nicolaaslyceum, Atrium en de gebouwen AKZO & Stibbe hebben nu al een eigen WKO-systeem. Voor de geplande gebouwen is er uitgegaan van de stedenbouwkundige plannen, zoals beschreven in het 'Masterplan WKO Zuidas Noord' (Zuidas, 2015). Onder deze gebouwen vallen de rechtbank, 2Amsterdam, Breevast, Strawinskyhuis & NPL en de woontoren⁴. De eigenschappen van de gebouwen in deze casestudie zijn in Tabel 14 opgenomen en gebaseerd op de resultaten van hoofdstuk 3:

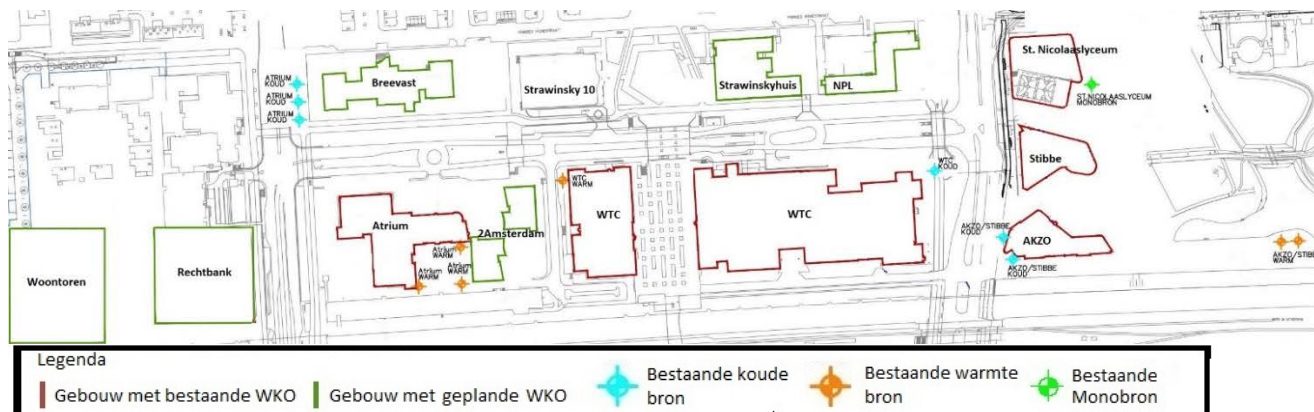
- de warmte- en koude-behoefte kunnen per kantoor verschillen. Sommige kantoren hebben een grotere warmtebehoefte, andere kantoren hebben weer een grotere koude-behoefte
- scholen hebben een grotere warmte- dan koude-behoefte
- Woningen hebben een grotere warmte- dan koude-behoefte.



Figuur 56: Kaart van de Zuidas met de afbakening van het gebied (rood) voor de casestudie

Bron: (Google Maps, 2017)

⁴ De eventuele uitbreiding van het WTC-gebouw valt buiten deze casestudie. Er bevindt zich nog één ander gebouw in het gebied, Strawinsky 10. Dit is een oud gebouw met slechte isolatie en wordt niet meer meegenomen in de herontwikkeling. Het gebouw is dan ook niet geschikt voor een WKO-systeem en wordt daarom niet meegenomen in het collectieve WKO-systeem ontwerp.



Figuur 57: Het onderzoeksgebied voor de casestudie Zuidas Noord in detail

Tabel 14: Een overzicht van de gebouwen die onderzocht worden in de casestudie

Naam gebouw	Bestaand WKO	Functie gebouw	Totaal BVO	Bron gegevens
WTC	Ja	Kantoor (k)	125.000 m ²	(WTC Amsterdam, 2016)
St. Nicolaaslyceum	Ja	Voorzieningen (w)	11.900 m ²	(WKO-tool, 2016)
Akzo	Ja	Kantoor (k)	16.556 m ²	(van Lieshout, 2013)
Stibbe	Ja	Kantoor (k)	14.950 m ²	(DVPC B.V., 2017)
Atrium	Ja	Kantoor (w)	65.000 m ²	(Zuidas, 2015)
Rechtbank	Nee	Kantoor (k)	52.000 m ²	(Zuidas, 2015)
2Amsterdam	Nee	Kantoor/Woningen (w en k)	35.000 m ²	(Zuidas, 2015)
Breevast	Nee	Woningen/Voorzieningen (w)	30.000 m ²	(Zuidas, 2015)
NPL/Strawinskyhuis	Nee	Woningen (w)	30.000 m ²	(Zuidas, 2015)
Woonstoren	Nee	Woningen (w)	50.000 m ²	(Zuidas, 2015)

Toelichting: (w) staat voor grotere warmtebehoefte, (k) staat voor grotere koude-behoefte. Vastgesteld in overleg met opdrachtgever Hompe en Taselaar.

5.3 Stap 2: uitgangspunten voor de berekeningen

Ten aanzien van deze casestudie zijn er op drie onderwerpen uitgangspunten van belang:

1. de kengetallen warmte- en koude-vraag van verschillende soorten gebouwen
2. het gebruik van beschikbare gegevens van bestaande WKO-systemen
3. Gegevens van geplande WKO-systemen.

Deze uitgangspunten zijn hierna als stap 2 uitgewerkt.

5.3.1 Kengetallen warmte- en koude-vraag verschillende soorten gebouwen

Om een indicatie te krijgen van de warmte- en koude-behoefte van verschillende soorten gebouwen is er gebruik gemaakt van kengetallen. De kengetallen⁵ zijn gebaseerd op referentieprojecten van Hompe en Taselaar. In Tabel 15 zijn de kengetallen voor drie type gebouwen weergegeven. Vervolgens kan de warmte- en koude-behoefte per jaar berekend worden:

⁵ De kengetallen zijn in Bijlage 1.2 Gegevens GGA (sub paragraaf 1.2.3) gecontroleerd met gegevens van het GGA.

$$Q_{\text{behoefte}} = \text{BVO} \times Q_{\text{vraag}}$$

Waarin:

Q_{behoefte} = Warmte- of koude- behoefte van het gebouw (kWh)

BVO = brutovloeroppervlakte van het gebouw (m²)

Q_{vraag} = vraag per jaar (kWh/m²)

Verder wordt ook het benodigde vermogen dat nodig is voor het gebouw berekend (derde kolom van rechts in beide tabellen).

$$P = \text{BVO} \times E \times C_{\text{gelijk}}$$

Waarin:

P = benodigd vermogen (W)

BVO = brutovloeroppervlakte van het gebouw (m²)

E = aansluitwaarde (W/m²)

C_{gelijk} = Gelijktijdigheid (%)

Tabel 15: Overzicht van warmte en koude kengetallen van 3 type gebouwen

	Warmte			Koude		
	Aansluitwaarde W/m ²	Gelijktijdigheid	Vraag/jaar Max. kWh/m ²	Aansluitwaarde W/m ²	Gelijktijdigheid	Vraag/jaar Max. kWh/m ²
Kantoren	50	75%	40	80	95%	50
Woningen	60	60%	20	30	70%	15
Voorzieningen*	45	70%	30	40	80%	30

Toelichting: Met de kengetallen kan er een indicatie gemaakt worden voor de warmte- en koude-behoefte van een gebouw per jaar. * = aanname voor scholen.

- Aansluitwaarde: het maximale vermogen per oppervlakte dat het gebouw nodig heeft (W/m²)
- Gelijktijdigheid: de tijd dat een gebouw een maximale vraag heeft (in %). Gedurende de dag is er niet constant een vraag van 100%
- Vraag/jaar: maximale vraag per oppervlakte die een gebouw nodig heeft (kWh/m²)

Bron kengetallen: referentieprojecten van Hompe & Taselaar

Deze kengetallen zijn gebruikt in de berekeningen voor alle gebouwen in deze casestudie. Alleen voor het gebouw Atrium (kantoor) wordt er voor de koude-behoefte een ander kengetal gebruikt. Van het Atrium is bekend dat het gebouw meer behoefte heeft aan warmte dan koude. Dit staat in het rapport 'Effectenstudie WKO-systeem' van Atrium omschreven (Ruis, 2015). In Tabel 16 zijn de kengetallen voor koude te zien, waarmee de koude-behoefte van Atrium berekend wordt.

Tabel 16: Overzicht van koude kengetallen voor het Atrium kantoorgebouw

	Koude		
	aansluitwaarde	gelijktijdigheid	vraag/jr
	W/m ²		Max kWh/m ²
kantoren	65	95%	40

Toelichting: Met deze kengetallen kan er een indicatie gemaakt worden voor de koude-behoefte per jaar voor het Atrium.

Bron kengetallen: referentieprojecten van Hompe & Taselaar én (Ruis, 2015).

In een WKO-systeem heeft een warmtepomp een bepaalde COP-waarde. Deze waarde is meestal 4,5 (kengetal Hompe en Taselaar). Daarom wordt deze waarde als uitgangspunten voor deze casestudie genomen, met uitzondering van het Atriumgebouw. Uit de gegevens van het rapport 'Effectenstudie WKO-systeem' is te berekenen dat het Atrium een COP heeft van 3,7 (Ruis, 2015).

5.3.2 Gebruik beschikbare gegevens bestaande WKO-systemen

Het tweede deel van deze stap is het verwerken en gebruiken van beschikbare gegevens over de bestaande WKO-systemen in het onderzoeksgebied. Op basis van de eerder genoemde vergelijkingen en het type gebouw wordt berekend hoeveel warmte- of koude behoefte er per gebouw is. Op basis daarvan kan ook de toevoeging van warmte of koude aan de bodem worden berekend alsmede de leveringen (en energieverbruik) van de warmtepomp(en).

De berekende warmte- en koude- behoeftes van de gebouwen met bestaande WKO-systemen in het onderzoeksgebied zijn in Tabel 17 weergegeven. De WKO-jaaropgaves van deze gebouwen zijn te vinden in de digitale bijlage "Jaaropgaves WKO-systemen WTC, AKZO, St. Nicolaaslyceum". In deze tabellen is per bestaand WKO-systeem te lezen wat maandelijks de onttrokken warmte en koude van de WKO is en wat de toegevoerde warmte en koude aan de bodem. De toegevoegde warmte en koude is als enige berekend, omdat deze niet zijn gegeven door de Omgevingsdienst. Tussen de toegevoegde warmte aan de bodem en de onttrokken warmte kan een klein of groot (bij WTC januari en december 2016) verschil zitten. Het kleine verschil kan in het gemiddelde onttrekkings- en injectie-temperaturen zitten en/of de hoeveelheid onttrokken water in de maand. De toegevoerde warmte aan de bodem is gebaseerd op gegevens van de Omgevingsdienst. Hier kunnen ook afwijkingen in zitten.

Uit de tabellen in de digitale bijlage "Jaaropgaves WKO-systemen WTC, AKZO, St. Nicolaaslyceum" blijkt dat de peilmomenten per complex niet ieder jaar hetzelfde zijn. Bovendien is er van het gebouw AKZO/Stibbe alleen het jaar 2016 geheel bekend. De totale uitkomsten van 2016 zijn in Tabel 18 weergegeven. Naast de onttrokken en toegevoegde warmte en koude van de WKO-systemen staat er in de tabel ook hoeveel warmte de warmtepomp levert aan het gebouw.

Voor het WTC, Atrium en St. Nicolaaslyceum zijn (naar aanleiding van de digitale bijlage) nog de volgende opmerkingen te maken over de bestaande gegevens:

WTC

Bij de jaaropgave 2016 van het WTC zit er tussen de onttrokken warmte en de toegevoegde koude aan de bodem een groot verschil. Dit verschil komt voornamelijk doordat er in de maanden januari en december grote hoeveelheden grondwater zijn onttrokken. Deze grote onttrekkingen zorgen voor veel geleverde warmte aan het gebouw. Het WTC creëert hierdoor een onbalans in de bodem van het WKO-systeem.

Atrium

Omdat het systeem nog maar net gerealiseerd is zijn er geen gebruiksgegevens beschikbaar. De gegevens voor het Atrium zijn daarom gebaseerd op rapport 'Effectenstudie WKO-systeem' (Ruis, 2015). Uit het rapport zijn ontwerpgegevens te halen. Daaruit blijkt dat het WKO-systeem gemiddeld in de zomer 2.360 MWh per jaar (koeling) en in de winter 3.250 MWh per jaar (verwarming) levert

aan het gebouw. Het gemiddelde energieverbruik van de warmtepomp is ook bekend. Deze is in de winter 890 MWh per jaar. Hiermee kan de COP van de warmtepomp en de onttrokken warmte uit de bodem berekend worden voor het Atrium (zie Bijlage 2.1 Uitleg berekeningen, onder 1. 'warmtepomp formule'). Verder levert de warmtepomp in de zomer restwarmte aan het gebouw van 185 MWh (gegevens uit 'Effectenstudie WKO-systeem'). Deze restwarmte moet in de zomer extra uit de bodem komen voor verkoeling van het gebouw. Per saldo is de geleverde koude aan het gebouw van het WKO-systeem 2.485 MWh per jaar.

St. Nicolaaslyceum

Voor het St. Nicolaaslyceum wordt er voor de koude-behoefte een andere waarde genomen en geen gebruik gemaakt van de koude-kengetallen. De reden hiervan is de volgende. Van het St. Nicolaaslyceum is bekend dat de koeling van het gebouw volledig wordt ingevuld met het WKO-systeem. Omdat de school deze extra koeling in de zomervakantie niet nodig heeft wordt er als uitgangspunt genomen dat de school een koude-behoefte heeft van de onttrokken koude (167 MWh) minus de extra koeling (ca. 74 MWh per jaar). Dit is in Tabel 17 en Tabel 18 ook terug te zien.

De bestaande WKO-systemen hebben ook ontwerpwaarden. Deze zijn terug te vinden in Bijlage 2.2 Ontwerpwaarden. Onder deze ontwerpwaarden worden de ΔT , pompcapaciteit en thermische invloedgebieden behandeld.

5.3.3 Gegevens geplande WKO-systemen

Het derde deel van deze stap is vaststellen van de aannames met betrekking tot de warmte en koude behoefte van de geplande WKO-systemen in de herontwikkelingsgebouwen in het onderzoeksgebied.

Voor de herontwikkelingsgebouwen zijn geen gegevens beschikbaar. Met de kengetallen is wel warmte- en koude-behoefte te bepalen en daar kunnen de geplande WKO-systemen op ontworpen worden. Daarbij worden de volgende aannames gedaan (zie formules in paragraaf 5.3.1):

- de onttrokken en toegevoegde warmte en koude aan de bodem zijn per saldo gelijk (per WKO-systeem)
- bij de totale warmtebehoefte wordt eerst de invulling van de warmtepomp afgetrokken zodat duidelijk is wat de invulling van de WKO kan zijn zonder invulling van de warmtepomp (zie Bijlage 2.1 Uitleg berekeningen, onder 1. 'warmtepomp formule')
- De minimale behoefte aan koude of warmte van het gebouw vormt de basis voor de capaciteit van het WKO-systeem. Extra behoeftes worden niet via het WKO-systeem ingevuld (anders ontstaat onbalans in de bodem).

Deze aannames worden in de volgende paragraaf gebruikt voor de berekeningen.

De geplande WKO-systemen (individueel en collectief, varianten) hebben ook ontwerpwaarden. Deze zijn terug te vinden in Bijlage 2.2 Ontwerpwaarden. Onder deze ontwerpwaarden worden de ΔT , pompcapaciteit en thermische invloedgebieden besproken.

5.4 Stap 3: berekenen van de energievraag van de gebouwen

In deze stap wordt, met behulp van de in de vorige stap verzamelde gegevens, de energievraag van de gebouwen in het onderzoeksgebied berekend. Per bestaand gebouw en gepland herontwikkelingsgebouw worden telkens met de besproken formules, aannames en gegevens voor warmte en koude behoefte een totaalberekening gemaakt. De gebouwgegevens worden geaggregeerd naar gebiedsniveau.

In deze casestudie worden de gegevens van het jaar 2016 als uitgangspunt genomen, omdat hier voor bijna alle bestaande WKO-systemen gegevens beschikbaar zijn. Op basis van de uitgangspunten zoals die in de vorige paragraaf zijn toegelicht kan de energievraag van de gebouwen worden berekend. De gebruikte formules voor de berekeningen zijn in Bijlage 2.1 Uitleg berekeningen terug te vinden.

Tabel 17: Behoeft en niet ingevulde MWh in bestaande WKO-systemen

Gebouwen met bestaande WKO	Warmtebehoefte gebouw (A) (MWh)	Koude behoefte gebouw (B) (MWh)	Warmte niet ingevuld met WKO (C) (MWh)	Koude niet ingevuld met WKO (D) (MWh)
WTC	5.000	6.250	1.488	4.257
Akzo/Stibbe	1.260	1.575	203	937
St. Nicolaaslyceum	357	92	114	0
Atrium	4.225	2.600	975	115
Totaal	10.842	10.518	2.780	5.310

Toelichting: de kolommen 'niet-ingevuld zijn opgenomen om te bepalen hoeveel MWh er nog ingevuld moet worden via het collectieve WKO-systeem. Letters A t/m D verwijzen naar tabel 18.

Tabel 18: Gegevens van bestaande WKO-systemen (2016)

Gebouwen met bestaande WKO	Onttrokken (geleverde) koude van bodem (=B-D) (MWh)	Onttrokken warmte van bodem (MWh)	Toegevoegde warmte aan bodem (MWh)	Toegevoegde Koude aan bodem (MWh)	Geleverde warmte WKO aan gebouw (= A-C) (MWh)
WTC	1.993	2.731	2.101	2.093	3.512
Akzo/Stibbe	638	822	666	832	1.057
St. Nicolaaslyceum	167	189	178	211	243
Atrium	2.485	2.360	2.485	2.360	3.250
Totaal	5.098	6.103	5.430	5.496	8.062

Tabel 19: Behoeftte en niet ingevulde MWh in geplande WKO-systemen (herontwikkelingsgebouwen)

Herontwikkelingsgebouw met WKO	Warmtebehoefte gebouw (A) (MWh)	Koude behoefte gebouw (B) (MWh)	Warmte niet ingevuld met WKO (C) (MWh)	Koude niet ingevuld met WKO (D) (MWh)
Rechtbank	2.080	2.600	0	982
2Amsterdam	1.100	1.225	0	369
Breevast	750	675	0	92
NPL/Strawinskyhuis	600	450	21	0
Woontoren	1.000	750	36	0
Totaal	5.530	5.700	57	1.443

Toelichting: de kolommen 'niet-ingevuld' zijn opgenomen om te bepalen hoeveel MWh er nog ingevuld moet worden via het collectieve WKO-systeem. Letters A t/m D verwijzen naar tabel 20.

Tabel 20: Gegevens van geplande-WKO-systemen (herontwikkelingsgebouwen)

Herontwikkelingsgebouw met WKO	Onttrokken (geleverde) koude van bodem (=B-D) (MWh)	Onttrokken warmte van bodem (MWh)	Toegevoegde warmte aan bodem (MWh)	Toegevoegde koude aan bodem (MWh)	Geleverde warmte WKO aan gebouw (= A-C) (MWh)
Rechtbank	1.618	1.618	1.618	1.618	2.080
2Amsterdam	856	856	856	856	1.100
Breevast	583	583	583	583	750
NPL/Strawinskyhuis	450	450	450	450	579
Woontoren	750	750	750	750	964
Totaal	4.257	4.257	4.257	4.257	5.473

Nu alle gegevens van de gebouwen bekend zijn en geaggregeerd naar gebiedsniveau kan worden bepaald welke varianten mogelijk zijn bij het aanleggen van een collectief WKO-systeem. Hiervoor kan het keuzemenu, zoals dat in paragraaf 4.4 is ontwikkeld, worden gebruikt. Het blijkt de gebouwen in het onderzoeksgebied een complex geheel vormen. Er komen meerdere typen gebouwen, verschillende warmte- en koude-behoeften op verschillende momenten in het gebied voor. Dit maakt het onderzoeksgebied geschikt voor een collectief WKO-systeem met een combinatie van de varianten 3 en 4 uit het keuzemenu dat in paragraaf 4.4 is ontwikkeld: gebruikers in het gebied hebben gelijktijdig een verschillende warmte- of koude vraag: *ringleiding met individuele warmtepompen, twee-pijpsysteem* (variant 3). Maar voor het gebouw 2Amsterdam geldt variant 4 (gebruikers in het gebied hebben gelijktijdig een verschillende warmte- en koude-vraag: *ringleiding met individuele warmtepompen, vier-pijpsysteem*), omdat in de gebouw zowel kantoren als woningen komen.

5.5 Stap 4: varianten WKO-systemen casestudie Zuidas Noord

5.5.1 Inleiding

In deze paragraaf worden drie varianten voor het gebied Zuidas Noord uitgewerkt:

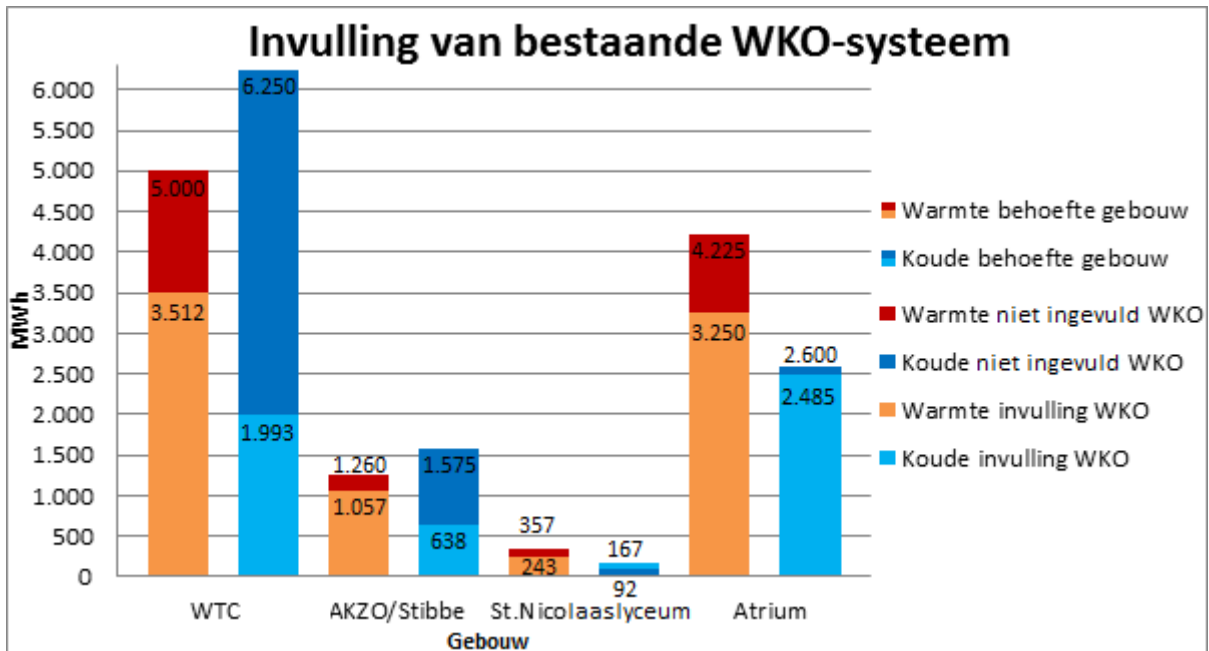
- de nul-variant. Deze variant laat zien wat de invulling van de energiebehoefte is wanneer elk gebouw een individueel WKO-systeem heeft (bestaand en gepland) (paragraaf 5.5.2)
- in variant 1 worden de WKO-systemen (bestaand en gepland) met elkaar gekoppeld via een ringleiding (paragraaf 5.5.3)
- In variant 2 wordt een geheel nieuw collectief WKO-systeem aangelegd, ter vervanging van bestaande systemen (paragraaf 5.5.4). Deze variant is daarmee meer theoretisch. Variant 2 kan als methode tevens gebruikt kunnen worden voor een nieuw te ontwikkelen gebied (in latere casestudies).

5.5.2 Nul-variant: individuele WKO-systemen

In deze paragraaf wordt er eerst gekeken naar de bestaande en herontwikkelingsgebouwen met een individueel WKO-systeem. In de paragrafen hiervoor zijn de uitgangspunten en aannames al besproken. Met deze gegevens is er berekend wat de warmte- en koude-behoefte en de warmte en koude invulling van de WKO-systemen op de gebouwen zijn. Eerst wordt er naar de bestaande gebouwen met een WKO-systeem gekeken, daarna zullen de herontwikkelingsgebouwen met een WKO-systeem behandeld worden. Voor alle gebouwen wordt berekend hoeveel warmte en koude er nog niet wordt ingevuld met het WKO-systeem, zolang de systemen niet met elkaar verbonden zijn. Daarnaast worden de WKO-systemen van de herontwikkelingsgebouwen ontworpen en gepositioneerd in het gebied. Uiteindelijk zal er een balans op worden gesteld voor het totale gebied wanneer de gebouwen allen een individueel WKO-systeem krijgen.

Bestaande gebouwen

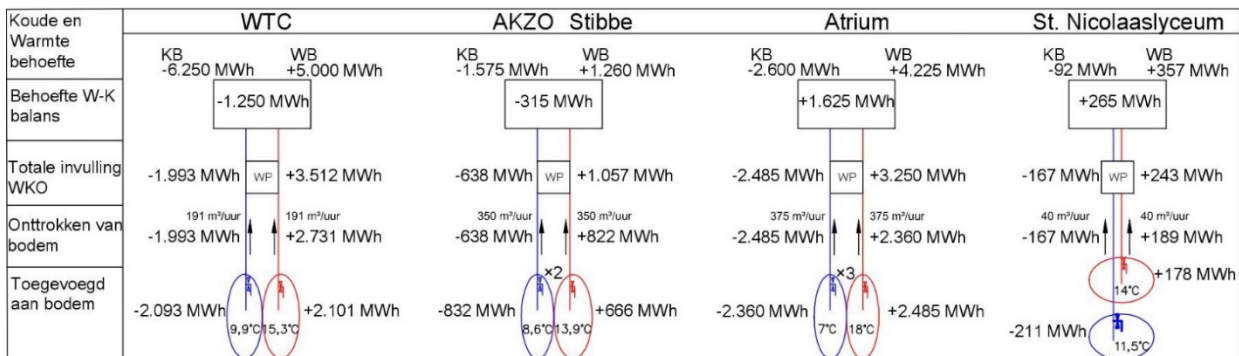
In het Zuidas Noord gebied zijn er momenteel vier WKO-systemen in gebruik. Drie van deze WKO-systemen zijn doubletbronnen (WTC, AKZO/Stibbe, Atrium) en het andere WKO-systeem is een monobron (St. Nicolaaslyceum). In Figuur 58 is te zien wat de totale warmte- (rood + oranje) en koude- (donker- + licht-blauw) behoeften van deze gebouwen zijn (berekening gebaseerd op gegevens uit Tabel 17). Ook geeft de figuur weer hoeveel warmte en koude er wel (oranje en lichtblauw) in wordt gevuld met het WKO-systeem en hoeveel niet (rood en donkerblauw). Bij de koude-behoefte van het St. Nicolaaslyceum is er met het WKO-systeem meer koude ingevuld dan er behoefte is, dit komt door de extra koeling in de zomervakantie.



Figuur 58: Invulling van de bestaande WKO-systemen op de warmte- en koude-behoefte van de gebouwen

Toelichting: Rood en donkerblauw is de warmte en koude die het WKO-systeem niet invult. Bij St. Nicolaaslyceum (de school) wordt extra gekoeld vandaar dat de koude invulling groter is dan de koude-behoefte.

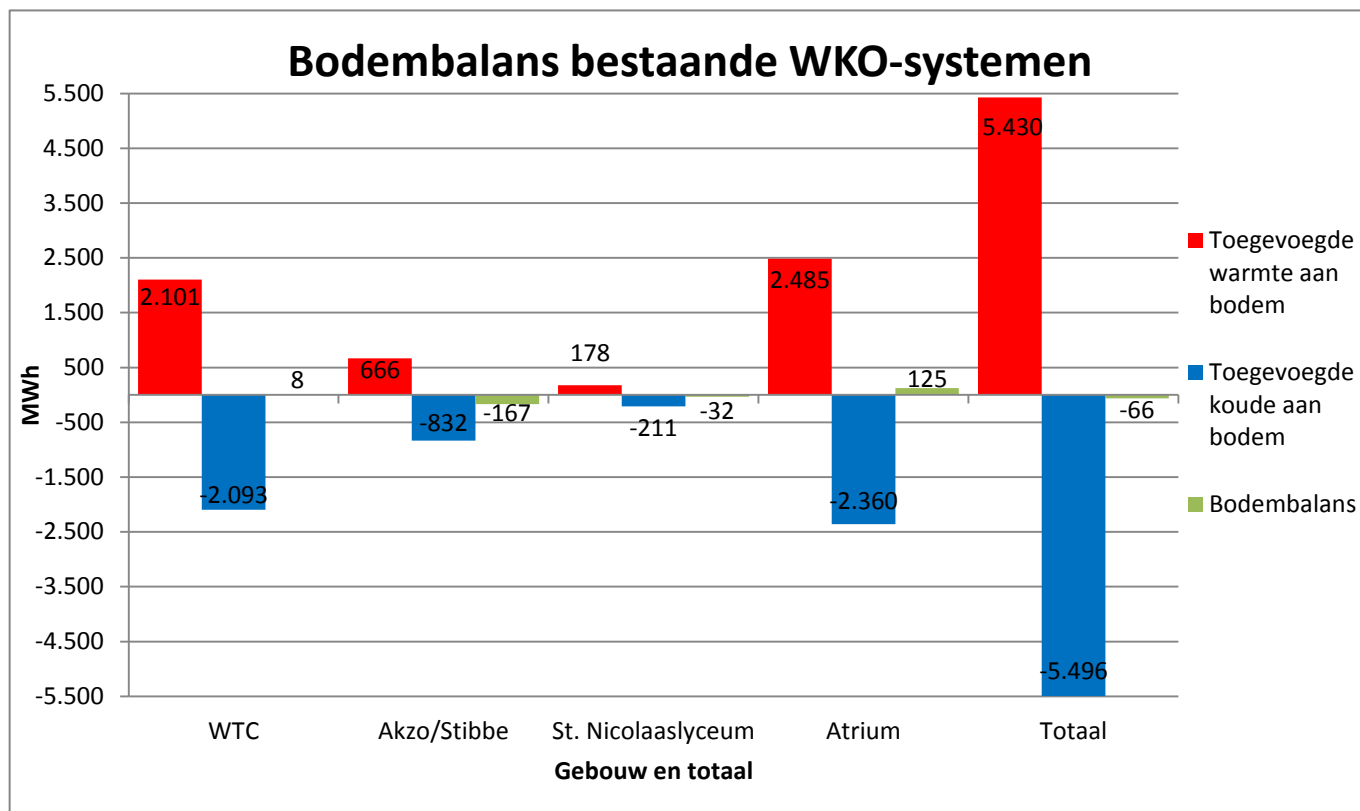
Alle bestaande gebouwen met WKO-systemen hebben in totaal 2.780 MWh extra warmte en 5.310 MWh extra koude nodig om de hele energiebehoefte met WKO te laten voeden. In Figuur 59 is een schema te zien waarbij de gegevens per WKO-systeem van de bestaande gebouwen zijn weergegeven. Er is te zien wat de warmte en koude-behoefte, onttrekkingen/toevoegingen en levering van de warmtepompen zijn. Daarnaast is er per WKO-systeem te zien wat de pompcapaciteiten en de jaarlijkse gemiddelde brontemperaturen zijn.



Figuur 59: Schematische weergave van de bestaande gebouwen met WKO-systemen

Bron: gegevens uit Tabel 18

De bodembalans van de bestaande WKO-systemen (zie Figuur 60) geeft aan dat er in totaal iets meer koude (5.496 MWh) aan de bodem wordt toegevoerd dan warmte (5.430 MWh). De totale bodembalans is -0,6% is (zie Bijlage 2.1 Uitleg berekeningen, onder 5. 'bodembalans formule'). Dit betekent dat er 0,6% meer koude is geladen in de bodem. Bij deze hoeveelheid kan er niet gesproken worden van een onbalans.



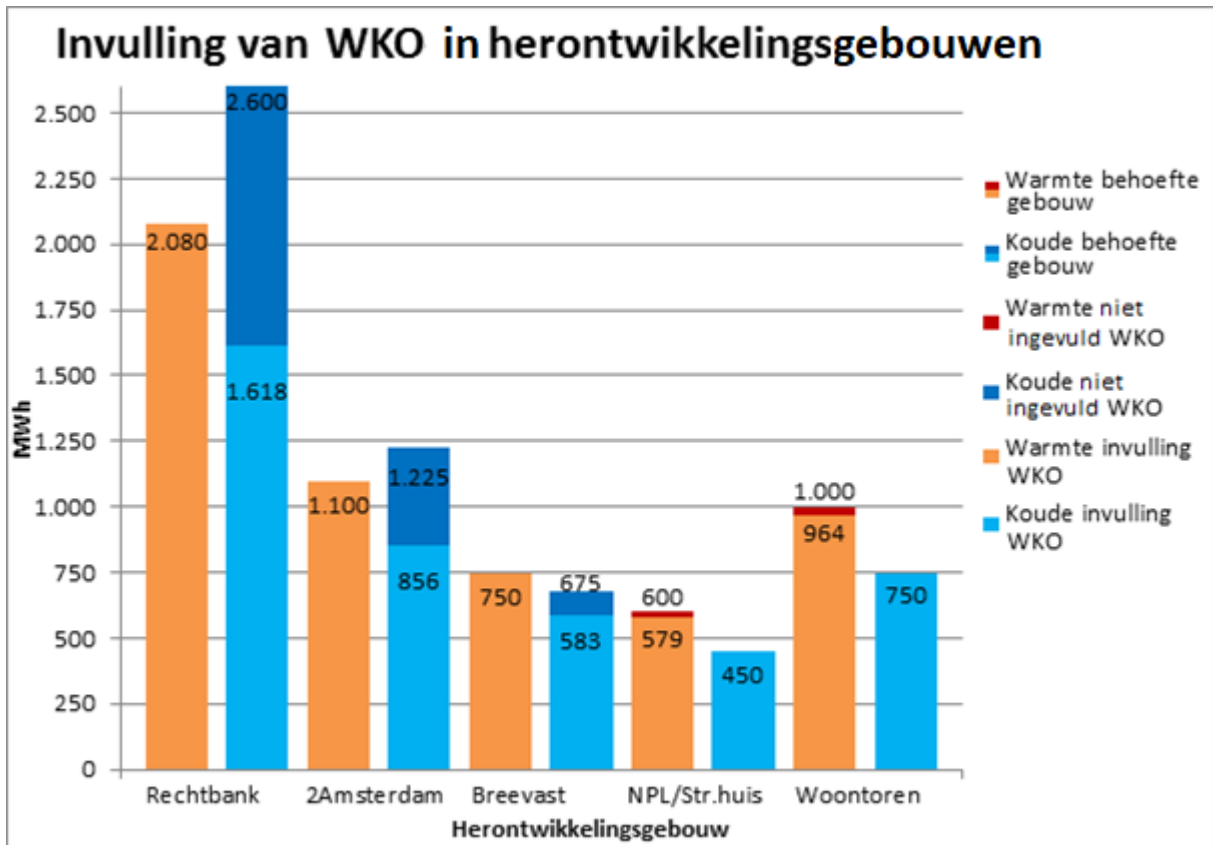
Figuur 60: Overzicht van de toegevoegde warmte en koude aan de bodem

Bron: gegevens uit Tabel 18

Bij de bestaande gebouwen wordt nog niet alle energiebehoefte ingevuld met WKO. Er kan nog invulling worden geleverd op de totale behoefte met nieuwe WKO-systemen of aanpassingen van de bestaande systemen. Deze extra invulling via WKO is in deze nul-variant niet opgenomen, omdat dit in de bestaande gebouwen een extra investering of vervanging van bestaande systemen vraagt (valt buiten scope onderzoek). Wel is berekend dat maximaal in totaal 1.849 MWh extra warmte en 1.430 MWh extra koude ingevuld kan worden bij de bestaande gebouwen (deze getallen zijn gebaseerd op de formule uit paragraaf 5.3.1 en de aanname uit paragraaf 5.3.3). In de vergelijking van de varianten worden deze getallen wel meegenomen.

Herontwikkelingsgebouwen

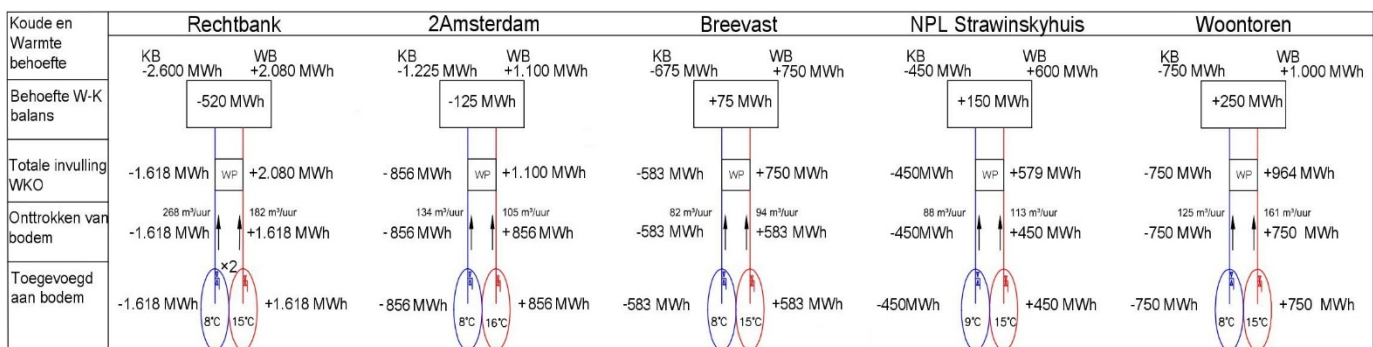
De warmte en koude-behoefte van de herontwikkelingsgebouwen zijn berekend en is in Figuur 61 per gebouw weergegeven. De warmte- (oranje) en koude- (lichtblauw) invulling van de ontworpen WKO-systemen is te zien. De koude-behoefte (lichtblauw) is bij NPL/Strawinskyhuis en de woontoren gelijk aan de koude invulling van de WKO-systemen. De warmtebehoefte (rood) voor de rechtbank, 2Amsterdam en Breevast kan volledig ingevuld worden met een individueel WKO-systeem, alleen voor de koude-behoefte wordt er in totaal 1.443 MWh niet ingevuld (zie Tabel 19, kolom 5). De gebouwen (NPL/Strawinskyhuis en woontoren) die niet alle warmte kunnen invullen met WKO hebben in totaal nog 57 MWh warmte nodig om de gehele behoefte te realiseren (Tabel 19, kolom 4).



Figuur 61: Invulling van de geplande WKO-systemen op de warmte- en koude-behoefte van de herontwikkelingsgebouwen

Toelichting: Rood en donkerblauw is de warmte en koude die het WKO-systeem niet invult. Wanneer een balk helemaal oranje of lichtblauw is, vult de WKO de hele behoefte in.

Voor de herontwikkelingsgebouwen zijn er aparte WKO-systemen ontworpen die invulling geeft op de totale koude-behoefte van het gebouw. In Figuur 62 is een overzichtelijk schema te zien van de individuele WKO-systemen van de herontwikkelingsgebouwen. De bodem van deze individuele WKO-systemen is in balans omdat er evenveel warmte en koude wordt onttrokken als geïnjecteerd.

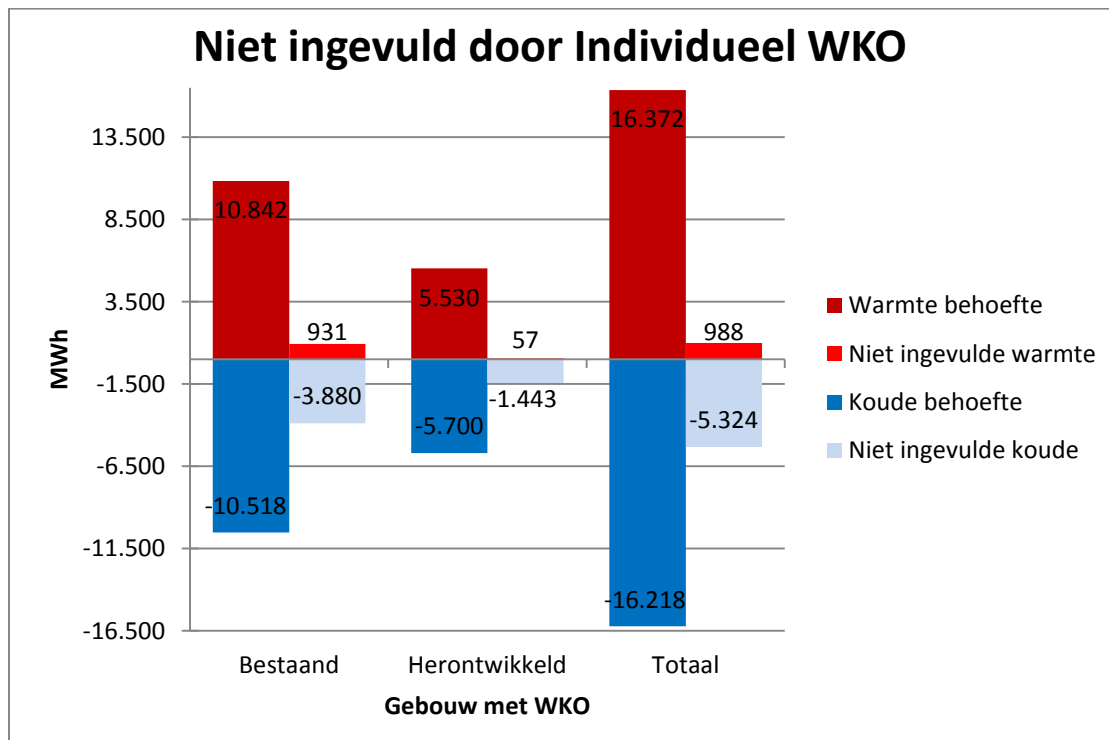


Figuur 62: Schematische weegave van de individuele WKO-systemen van de herontwikkelingsgebouwen

Toelichting: NPL en Strawinskyhuis hebben een gezamenlijk WKO-systeem.

Bron: gegevens uit Tabel 19 en Tabel 20

Hiermee is de nul-variant bepaald. In Figuur 63 is een overzicht gegeven wat er bij de bestaande en herontwikkelingsgebouwen met individuele WKO-systemen totaal wordt ingevuld.



Figuur 63: Overzicht van nul-situatie

Bron: gegevens uit Tabel 17 (bestaand) en Tabel 19 (herontwikkelingsgebouwen)

In de nul-variant heeft elk gebouw een individueel WKO-systeem, waarbij een deel van de totale warmte en koude behoefte niet wordt ingevuld door WKO-systemen. Deze niet-ingevulde behoefte is de basis van de nul-variant. Voor de herontwikkelingsgebouwen kunnen de warmte en koude-behoefte met individueel WKO-systeem goed ingevuld worden. Voor de bestaande gebouwen wordt zeker nog niet alles ingevuld met het WKO-systeem. Wanneer er voor elk gebouw een individueel WKO-systeem wordt toegepast wordt er in totaal 988 MWh warmte en 5.324 MWh koude van de totale behoefte in het gebied niet ingevuld met de WKO-systemen. Het tekenontwerp is in Figuur 64 te zien en Tabel 40 en Tabel 41 zijn de ontwerpwaarden van de bronnen te vinden (zie Bijlage 2.2 Ontwerpwaarden voor deze tabellen).

5.5.3 Variant 1: collectief WKO-systeem gecombineerd met bestaande WKO-systemen

In deze paragraaf wordt het collectieve ontwerp als aanvulling op de bestaande systemen beschreven. Het collectief ontwerp moet een invulling geven op de warmte- en koude-behoefte van de herontwikkelingsgebouwen en van de gebouwen met bestaande WKO-systemen. Het opstellen van de variant voor een collectief WKO-systeem gecombineerd met bestaande WKO-systemen is als volgt gedaan:

1. De berekening van de niet-ingevulde warmte- en koude-behoefte vormt de basis (MWh)
2. Deze getallen worden gebruikt voor het ontwerp van het collectieve WKO-systeem:
 - a. bij de totale warmtebehoefte wordt eerst de invulling van de warmtepomp afgetrokken zodat duidelijk is wat de invulling van de WKO kan zijn zonder invulling van de warmtepomp (zie Bijlage 2.1 Uitleg berekeningen, onder 1. 'warmtepomp formule')
 - b. de minimale behoefte aan koude of warmte van het gebouw vormt de basis voor de capaciteit van het collectieve WKO-systeem. Extra behoeftes worden niet via het WKO-systeem ingevuld (anders ontstaat onbalans in de bodem).
 - c. Vervolgens wordt met deze gegevens de benodigde pompcapaciteit berekend (zie Bijlage 2.1 Uitleg berekeningen, onder 3. 'pompcapaciteits formule')
 - d. Vervolgens kan het aantal benodigde bronnen worden berekend
 - e. Tot slot wordt het thermische invloedgebied berekend (zie Bijlage 2.1 Uitleg berekeningen, onder 4. 'invloedgebied')
3. Op basis van de bestaande indeling van het gebied (bestaande WKO-systemen) worden de bronlocaties bepaald:
 - a. Er wordt gekeken naar de locatie van de bestaande bronnen
 - b. Extra bronnen worden toegevoegd om het collectieve WKO-systeem te voeden.

WKO-ontwerp

In Tabel 21 is gemarkeerd hoeveel warmte- en koude-behoefte er nog niet met WKO-systemen is ingevuld en waar het collectieve WKO-systeem op ontworpen moet worden.

Tabel 21: Overzicht nul-situatie en invulling collectieve WKO-systeem

	Warmte behoefte (MWh)	Koude behoefte (MWh)
Herontwikkelings-gebouwen (totale behoefte) zie Tabel 19, kolommen A en B	5.530	5.700
Bestaande gebouwen (nog niet ingevulde behoefte): zie Tabel 17, kolommen C en D	2.780	5.310
Totaal	8.310	11.010

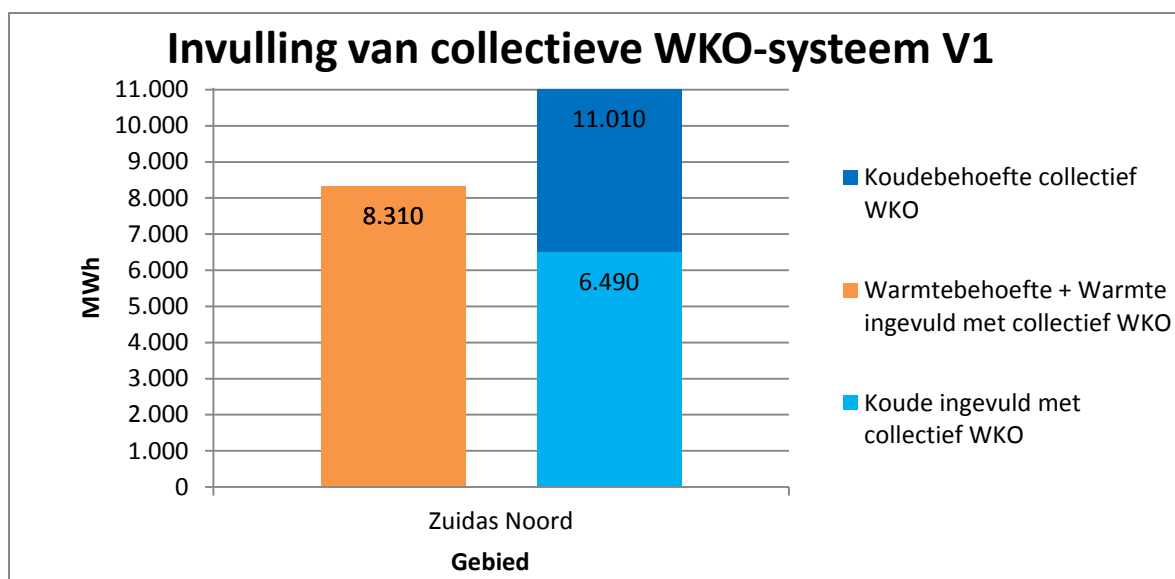
Er wordt een collectief ontwerp gemaakt op warmtebehoefte die nog ingevuld moet worden, namelijk 8.310 MWh. Dit is 5.530 MWh als totale warmtebehoefte van de herontwikkelingsgebouwen plus 2.780 MWh nog niet ingevulde warmtebehoefte van de bestaande gebouwen. De totale nog niet ingevulde koude-behoefte is groter, namelijk 11.010 MWh, maar omdat het WKO-systeem evenveel koude als warmte aan de bodem moet onttrekken om deze in balans te houden is de warmtebehoefte bepalend.

Bij de warmte- en koude-behoefte van bestaande gebouwen hebben het Atrium en het St. Nicolaaslyceum allebei andere kengetallen dan de overige bestaande kantoorpanden met een WKO-systeem. Bij het Atrium wordt er 975 MWh warmte en 115 MWh koude nog niet ingevuld met het WKO-systeem (zie Tabel 17). De benodigde onttrokken warmte uit de bodem is voor het Atrium 711 MWh⁶ Bij het St. Nicolaaslyceum is 114 MWh warmte die nog niet is ingevuld. Deze waarden worden ook meegenomen bij de berekeningen van het collectieve ontwerp. Wanneer de bestaande systemen op het collectieve systeem worden aangesloten zullen de ΔT 's van de bestaande WKO-systemen na verloop van tijd veranderen. Deze stromen namelijk door dezelfde ringleidingen, waardoor er voor het hele WKO-systeem één ΔT ontstaat. Daarmee is onderbouwd hoe met de afwijkende waarden (ΔT) van Atrium in het geheel wordt omgegaan.

Alle warmtepompen hebben een COP-waarde van 4,5, behalve het Atrium. Het Atrium heeft als enige een andere COP-waarde, namelijk 3,7. De onttrekking van warmte en koude wordt berekend door voor alle gebouwen de COP van de warmtepomp van de nog niet ingevulde warmtebehoefte af te trekken. Het collectieve WKO-systeem kent maximaal een warmte- en koude-onttrekking van 6.416 MWh⁷. Verder kan de extra verkoeling van het St. Nicolaaslyceum (74 MWh) ook gebruikt worden voor andere gebouwen die aangesloten zijn op het collectieve WKO-systeem. De totale koude invulling is dan 6.490 MWh (6.416 + 74). In Figuur 65 is te zien hoeveel het collectieve WKO-systeem invult voor de nog niet ingevulde behoeftes van bestaande gebouwen en de totale behoeftes van de herontwikkelingsgebouwen. De warmte invulling is groter dan de koude, omdat hier nog de warmtelevering van de warmtepompen bijkomt.

⁶ Het getal 711 MWh is de nog niet ingevuld behoefte van het Atrium minus de warmtepomp. Deze getallen zijn berekend met de warmtepomp formule en COP-waarde van Atrium, zie Bijlage 2.1 Uitleg berekeningen. De benodigde pompcapaciteit hiervoor is voor de warmtebron 19 m³/uur en voor de koude-bron 16 m³/uur (bereken met pompcapaciteit formule, zie Bijlage 2.1 Uitleg berekeningen). Daarnaast komt er nog 104 m³/uur voor de koude-bron bij, omdat de bestaande bron van Atrium normaal een ΔT van 11°C had in plaats van 7°C (in Bijlage 2.2 Ontwerpwaarden wordt het uitgangspunt ΔT 7°C toegelicht). Deze drie waarden met betrekking tot het Atrium worden in de berekeningen van de benodigde pompcapaciteit meegenomen.

⁷ Zie Tabel 21, totale warmtebehoefte (8.310 MWh) minus de warmtebehoefte van het Atrium, minus de levering van de warmtepomp plus correctiefactor⁶ van Atrium: $(8310 - 975) / (4,5 * 3,5) + 711 = 6416$



Figuur 65: Invulling van het collectieve WKO-systeem variant 1

Toelichting: Invulling van het collectieve WKO-systeem op de nog niet ingevulde warmte- en koude-behoefte van bestaande gebouwen en de totaal warmte- en koude-behoefte van herontwikkelingsgebouwen.

De warmtebehoefte wordt compleet ingevuld door het collectieve WKO-systeem, alleen voor de koude-behoefte is er 4.520 MWh (11.010 – 6.490) nog niet ingevuld door het WKO-systeem. Er is wel een daling van 804 MWh koude met het collectieve WKO-systeem in vergelijking met individuele WKO-systemen. Het is lastig om deze koude met extra WKO-bronnen te voeden, omdat de bodem van het WKO-systeem in balans moet blijven.

Bij de onttrekking van 6.416 MWh warmte en koude is een pompvermogen nodig van 7.335 kW (warmte) en 9.353 kW (koude), zie berekening 'benodigd vermogen' paragraaf 5.3.1. Er is voor de koude-levering een benodigde pompcapaciteit van 1.225 m³/uur nodig en voor de warmtelevering 845 m³/uur (zie Bijlage 2.1 Uitleg berekeningen, onder 3. 'pompcapaciteit formule'). In Tabel 22 zijn de ontwerpuitkomsten samengevat.

Tabel 22: Ontwerpgegevens van het collectieve WKO-systeem variant 1

Collectieve bronnen* (warmte/koude)	Locatie	ΔT (°C)	Pompcapaciteit* (m ³ /uur)	Filterlengte (m)	Bereik bel per bron* (m)
Koude (x5)	Zie tekening in Figuur 66	7	245	60	66
Warmte (x5)	Zie tekening in Figuur 66	7	245	60	66

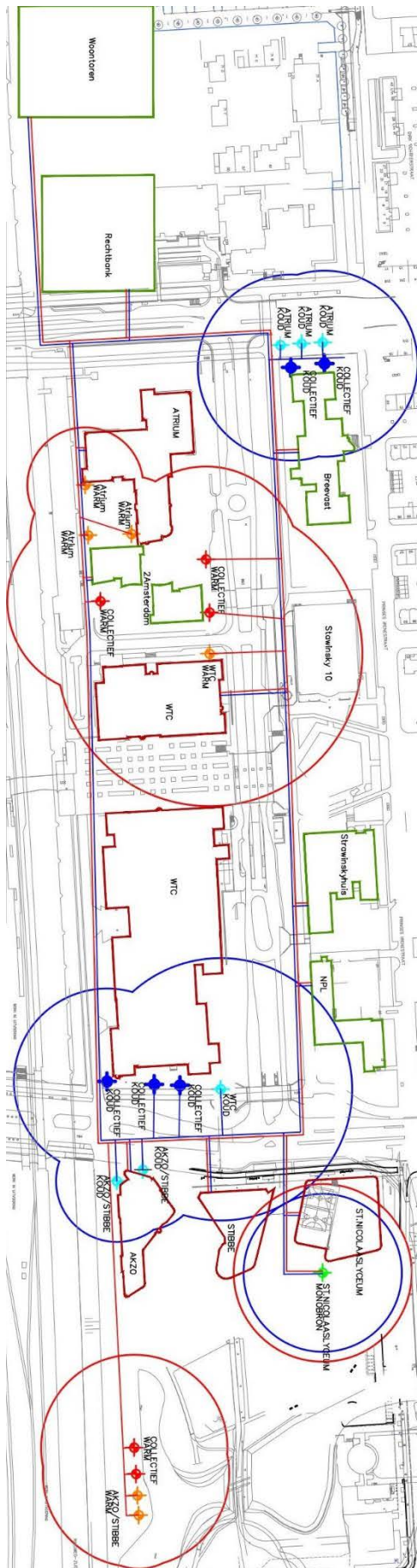
Toelichting: * Berekend met formules in Bijlage 2.1 Uitleg berekeningen, onder 3. 'pompcapaciteit formule' en onder 4. 'invloedgebied'.

Bronlocaties

Het tekenontwerp is in Figuur 66 te zien. In het collectieve WKO-systeem van deze variant blijkt dat er eigenlijk maar vier extra warmtebronnen nodig zijn (berekend op basis gegevens Tabel 22). Toch is er gekozen voor vijf extra warmtebronnen omdat het aantal warmtebronnen dan gelijk is aan het aantal koude-bronnen. Kortom, er wordt gekozen voor evenveel extra warmte- als koude bronnen omdat:

- de injectieleidingen van de warmtebronnen de maximale injectie aan moeten kunnen wanneer er maximaal gekoeld moet worden
- een leiding van een bron ontworpen wordt op de maximale pompcapaciteit. Wanneer er een piekvraag is naar koude (maximale onttrekking van 1.225 m³/uur, namelijk 245 maal 5) zal er 61,25 m³/uur/warmtebron meer warmte geïnjecteerd moeten worden in de warmtebronnen dan dat ze kunnen onttrekken (maximale onttrekking 980 m³/uur bij slechts vier warmtebronnen). Hier zijn de leidingen niet op ontworpen.
- het grondwatervolume van vier warmtebronnen (1.035.000 m³/bel) per bel ook veel groter is dan het grondwatervolume van vijf koude-bronnen (787.000 m³/bel) (berekend met 4. 'invloedgebied formule', Bijlage 2.1 Uitleg berekeningen). De bodem moet in balans blijven en het is moeilijk om even veel te blijven onttrekken wanneer er meer geïnjecteerd wordt in de bronnen. Bij vijf warmte- en koude-bronnen liggen de hoeveelheden grondwater per bel dichtbij elkaar (vijf warmtebronnen 786.000 m³/bel).

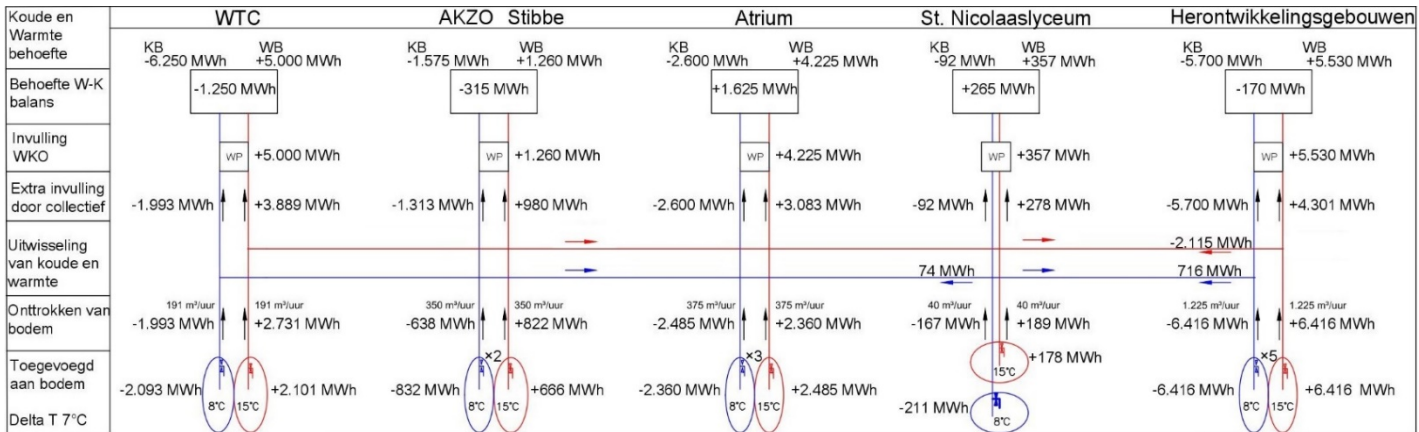
In Figuur 67 is een schematische weergave te zien van het collectieve WKO-systeem.



Legenda

- ▬ Gebouw met bestaande WKO
- ▬ Gebouw met geplande WKO
- ⊕ Bestaande koude bron
- ⊕ Bestaande warmte bron
- ⊕ Bestaande Monobron
- ⊕ Nieuwe koude bron
- ⊕ Nieuwe warmte bron
- Warmte invloed gebied
- Koude invloed gebied
- ▬ Warmte aanvoer en retourleiding
- ▬ Koude aanvoer en retourleiding

Figuur 66: Kaart Zuidas Noord met het collectieve WKO-systeem variant 1 (ontwerp)



Figuur 67: Schematische weergave van het collectieve WKO-systeem variant 1

Toelichting: Deze getallen zijn gebaseerd op de bestaande WKO-systemen plus de invulling van de extra bronnen van het collectieve WKO-systeem.

Om de overige koude-behoefte ook duurzaam in te vullen zijn er een aantal mogelijkheden. Omdat de bodem in balans is, is het niet mogelijk hiervoor een recirculatiesysteem toe te passen. De overige niet ingevulde koude met WKO kan met andere duurzame energie opwekkers ingevuld worden. Dit kan bijvoorbeeld met droge koelers of zonnecollectoren (voeding voor airco).

Een andere oplossing om de koude toch in te vullen met het collectieve WKO-systeem is om meerdere warmtevragers op het collectieve WKO-systeem aan te sluiten. Wanneer er meer gebouwen met een warmtebehoefte aan worden gesloten, zal er meer warmte onttrokken moeten worden uit de bodem en in de balans kan er ook meer koude worden onttrokken. Deze koude kan dan gebruikt worden voor de nog niet ingevulde koude-behoefte van de gebouwen. Op deze manier wordt de energie-efficiëntie op gebiedsniveau groter. Ten noorden (van Strawinsky) en ten oosten (Beethoven fase 2) van het afgebakende gebied bevinden zich veel woningen (warmtevragers). Deze woningen kunnen in de toekomst wellicht een invulling geven aan de warmtevraag in het collectieve WKO-systeem. Om de nog niet ingevulde koude (4.520 MWh) te voeden met het collectieve WKO-systemen zal er 904.000 m² BVO van woningen⁸ aangesloten moet worden. Verder zijn warmtevragers als zwembaden en scholen ook zeer geschikt om het rendement van het WKO-systeem te vergroten.

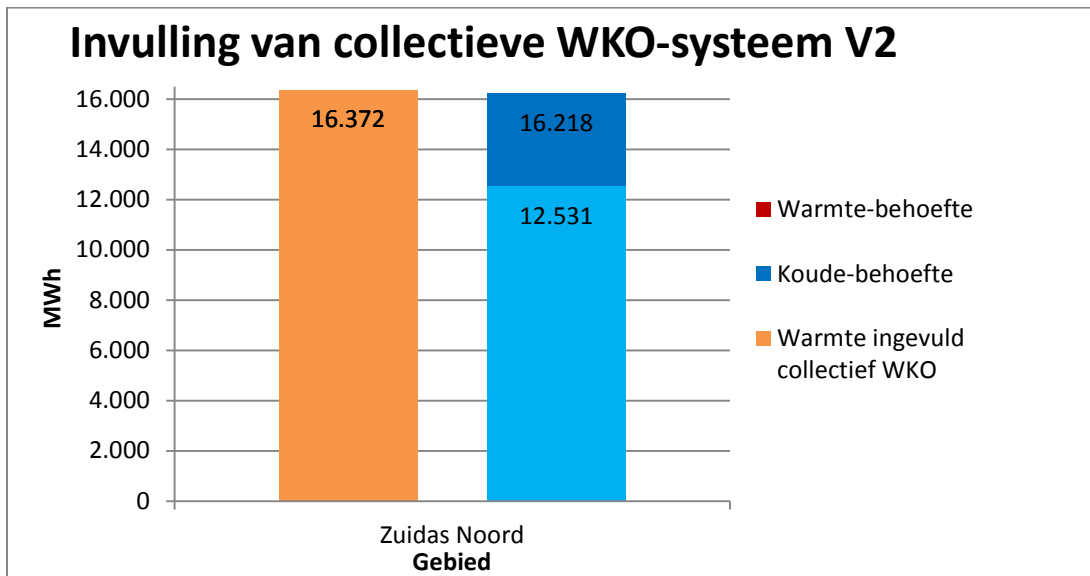
5.5.4 Variant 2: geheel nieuw collectief WKO-systeem

Bij de tweede variant wordt er niet gekeken naar de bestaande WKO-systemen, maar wordt er uitgegaan van een geheel nieuw collectief WKO-systeem dat alle bestaande systemen vervangt. Er wordt daarmee een ontwerp gemaakt voor het gebied in het theoretische geval dat er nog geen WKO-systemen waren. Het stappenplan voor dit ontwerp is gelijk aan dat van variant 1 (zie paragraaf 5.5.3) met dien verstande dat er geen rekening wordt gehouden met bestaande WKO-systemen. De te doorlopen stappen en gehanteerde formules zijn dezelfde.

⁸ Uitgaande van ca. 150 m² per woning betreft het hier dan ca. 6.000 woningen.

WKO-ontwerp

Bij dit ontwerp is de warmte- en koude-behoefte gebaseerd op de totale maximale behoefte van alle gebouwen die in de casestudie zijn meegenomen (optelsom van alle maximale individuele behoeften), namelijk 16.372 MWh warmte- en 16.218 MWh koude-behoefte. In Figuur 68 en Tabel 23 is de invulling van het collectieve WKO-systeem (met aanpassing van bestaande WKO) weergegeven. Het WKO-systeem vult de warmtebehoefte weer compleet in en op de koude-behoefte wordt 3.687 MWh niet ingevuld.



Figuur 68: Invulling van het collectieve WKO-systeem variant 2

Toelichting: Invulling van het collectieve WKO-systeem op totale maximale warmte- en koude-behoefte van het gebied Zuidas Noord in de onderzochte gebouwen.

Tabel 23: Warmte- en koude-behoefte in variant 2

	Warmte (MWh)	Koude (MWh)
Totale behoefte gebied	16.372	16.218
Invulling collectief WKO (variant 2)	16.372	12.531
Niet ingevuld collectief WKO (variant 2)	0	3.687

De in de tabel genoemde waarden voor koude verschillen met variant 1 (de niet ingevulde koude-behoefte van het collectieve WKO-systeem met bestaande WKO-systemen). Dit verschil komt omdat er bij de eerste variant gegevens van bestaande WKO-systemen zijn gebruikt (zoals warmte en koude onttrokken en toegevoegd aan de bodem). In de tweede variant wordt er vanuit gegaan dat er evenveel warmte als koude wordt onttrokken. In de gegevens van de eerste variant wordt er meer warmte van de bodem onttrokken dan koude, waardoor de niet ingevulde koude bij de eerste variant groter is dan bij de tweede.

In Tabel 24 zijn de ontwerputkomsten van het WKO-systeem weergegeven als er een geheel nieuw systeem wordt toegepast zonder bestaande WKO-systemen.

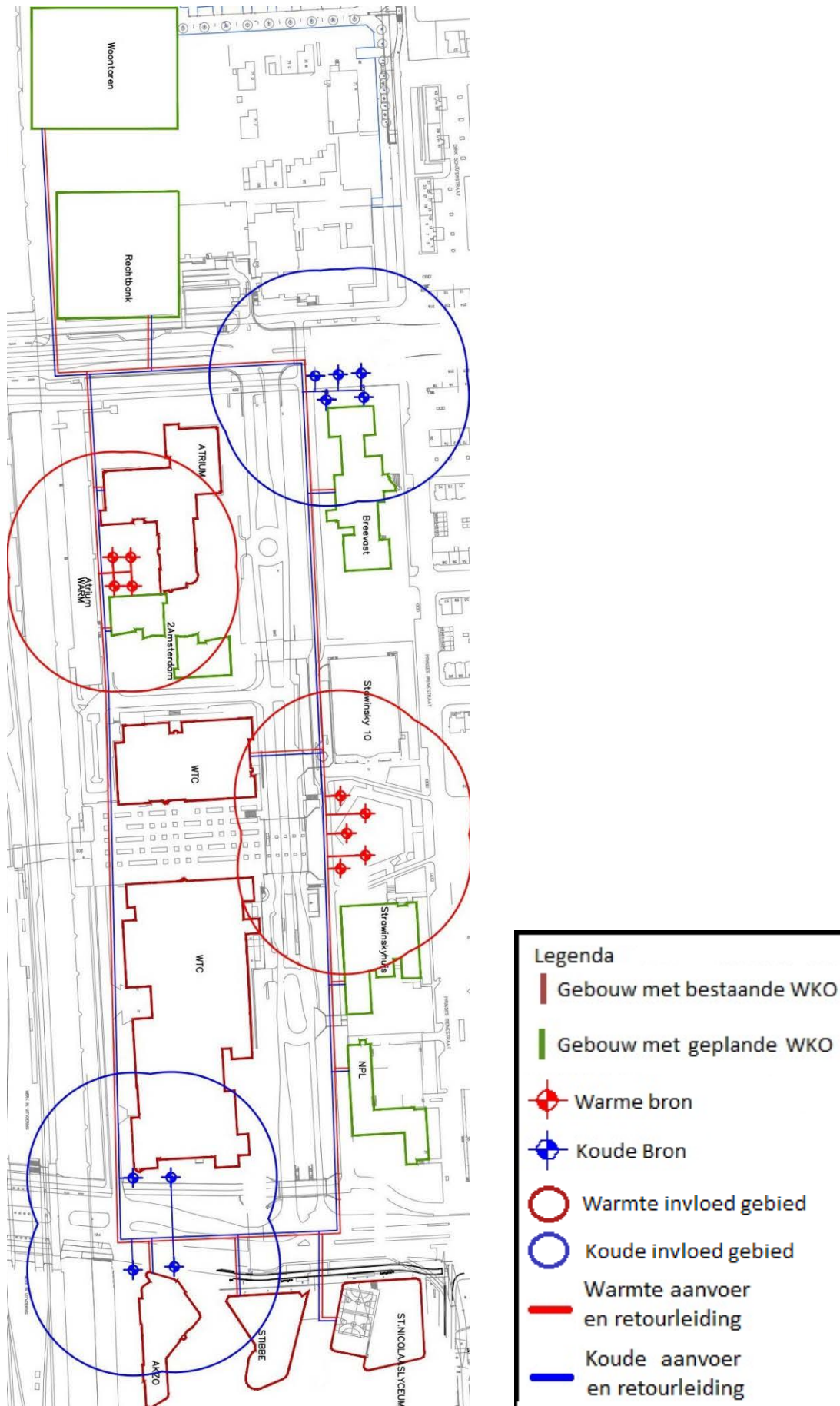
Tabel 24: Ontwerpwaarden van het collectieve WKO-systeem variant 2

Collectieve bronnen* (warmte/koude)	ΔT (°C)	Benodigde pompcapaciteit* (m ³ /uur)	Pompcapaciteit per bron* (m ³ /uur)	Filterlengte (m)	Bereik bel per bron* (m)
Koude(x9)	7	2.123	236	60	69
Warmte (x9)	7	1.356	236	60	69

Toelichting: * Berekend met formules in Bijlage 2.1 Uitleg berekeningen.

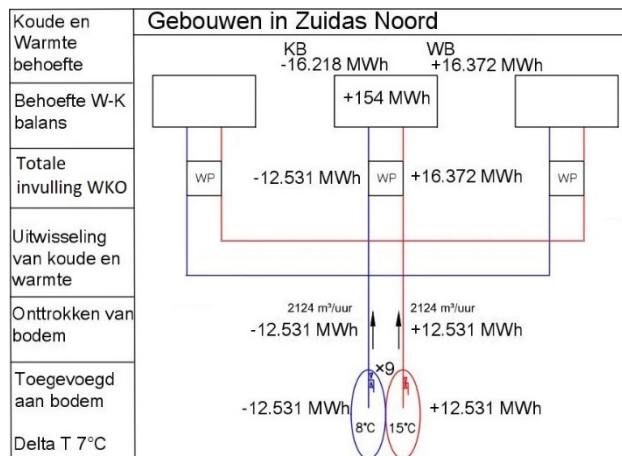
Bronlocaties

In Figuur 69 is het ontwerp van het collectieve WKO-systeem variant 2 te vinden. In deze variant is er sprake van 18 bronnen. Deze bronnen zijn in warmte en koude clusters geplaatst. De locaties van deze bronnen is anders dan in variant 1, omdat hier geen rekening hoeft te worden gehouden met bestaande bronnen.



Figuur 69: Kaart Zuidas Noord met het collectieve WKO-systeem variant 2 (ontwerp)

Figuur 70 geeft een schematisch overzicht van het collectieve WKO-systeem wanneer deze geheel met nieuwe WKO-bronnen wordt toegepast.

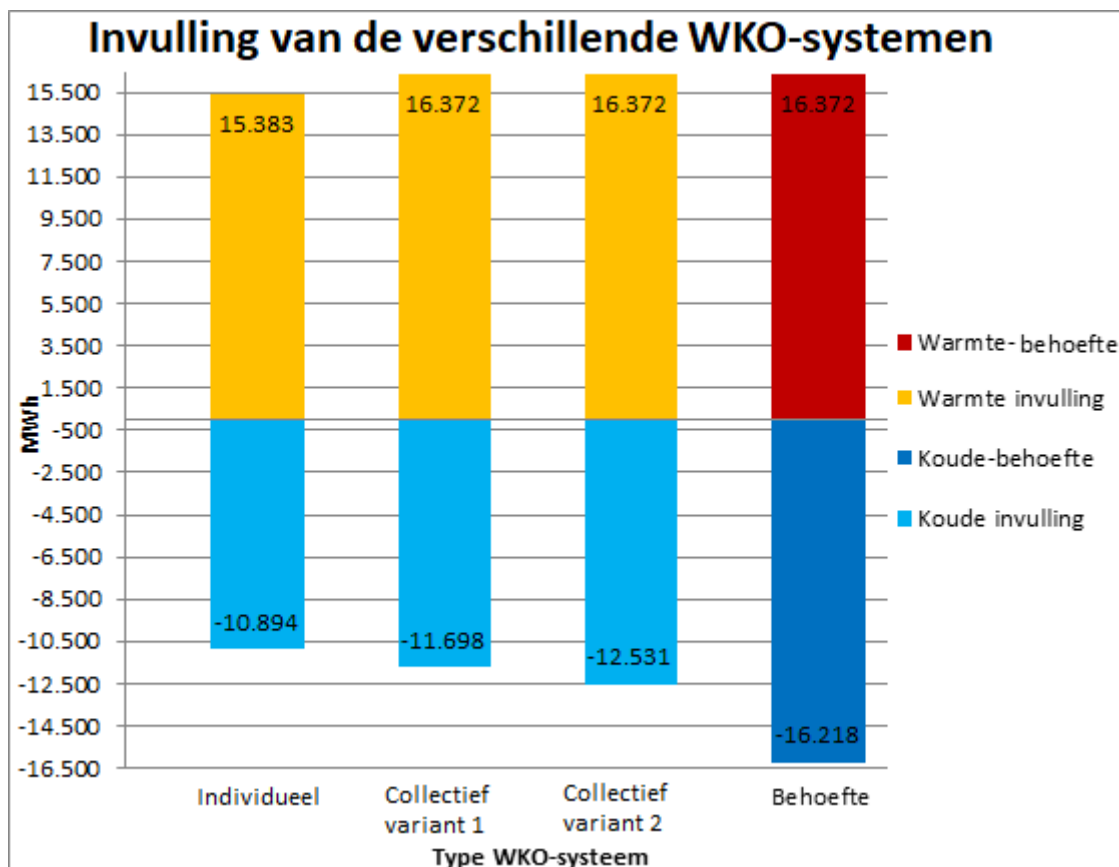


Figuur 70: Schematische weegave van het collectieve WKO-systeem variant 2

De niet ingevulde koude kan net als bij variant 1 opgelost worden door grote warmtevragers aan te sluiten op het collectieve WKO-systeem. Om de nog niet ingevulde koude (3.687 MWh) te voeden met het collectieve WKO-systemen zal er 737.400 m² BVO van woningen (ca. 4.900 woningen) aangesloten moeten worden.

5.6 Stap 5: vergelijking van de varianten casestudie Zuidas Noord

In Figuur 71 wordt de invulling van de warmte- en koude-behoefte en de mogelijke warmte- en koude-invulling via WKO in de drie beschreven varianten met elkaar vergeleken. In Tabel 25 worden de warmte- en koude-invulling via WKO op de totale behoefte weergegeven en worden variant 1 en 2 met de nul-variant vergeleken. Ook is het aantal benodigde bronnen per variant weergegeven.



Figuur 71: Invulling van WKO-systemen op de totale behoefte van alle gebouwen

Toelichting: Het collectieve WKO-systeem (variant 1 en 2) geeft een gehele invulling op warmtebehoefte van alle onderzochte gebouwen. Voor de huidige koude-behoefte vullen de individuele systemen 5.310 MWh **niet** in. Voor de koude-behoefte levert het collectieve WKO-systeem in variant 1 4.520 MWh **niet** in, in variant 2 3.687 MWh **niet** in. Het verschil tussen de varianten 1 en 2 voor wat betreft niet-ingevoelde koude behoefte wordt toegelicht bij Tabel 23.

Tabel 25: Besparing van collectieve WKO-systemen in vergelijking met individuele WKO-systemen

	Warmte niet ingevuld (MWh)	Warmte ingevuld	Koude niet ingevuld (MWh)	Koude ingevuld	Aantal bronnen
Totale behoefte	16.372	n.v.t.	16.218	n.v.t.	n.v.t.
Individueel	990	94%	5.324	67%	28
Variant 1	0	100%	4.520	72%	24
Variant 2	0	100%	3.687	77%	18

Uit deze figuur en tabel blijkt het volgende.

- Bij individuele WKO-systemen (nul-variant) moet er in het gebied nog steeds 990 MWh worden verwarmd met conventionele systemen.
- Bij beide collectieve varianten wordt de totale warmtebehoefte via WKO ingevuld, de koude-behoefte wordt voor een groot deel ingevuld.
- Bij beide collectieve varianten wordt de totale koude-behoefte in variant 1 en 2 beter ingevuld dan in de nul-variant (nul-variant 67%, variant 1 72% en variant 2 77%).

- Het aantal bronnen verschilt per variant en is in de nul-variant het grootst (28), in de collectieve varianten zijn in variant 1 24 bronnen nodig (10 extra en opzichte van de huidige situatie) en in variant 2 18 bronnen nodig (zie paragraaf 5.5.3).
- Bij de varianten 1 en 2 neemt de complexiteit van het leidingennetwerk toe vanwege de benodigde aanleg van een ringleiding.
- Bij variant 2 kan de aquifer beter benut worden dan in de nul-variant.

5.7 Stap 6: Samenvatting en oordeel casestudie Zuidas Noord

Uit het onderzoek is gebleken dat de gebouwen in het gebied Zuidas Noord met een WKO-systeem (bestaand en gepland) gezamenlijk iets meer een warmte- dan een koude-behoefte hebben (zie Figuur 71). Momenteel worden niet alle warmte- en koude-behoefte van de gebouwen ingevuld met WKO-systemen (zie Tabel 17). Zeker voor de (extra) koude-vraag worden conventionele systemen gebruikt. Voor de toekomst zijn er voor vijf herontwikkelingsgebouwen in het gebied (nu nog zonder WKO) nieuwe WKO-systemen gepland. Met behulp van een toekomstige collectief WKO-systeem kan de conventionele invulling verlaagd of overbodig worden. Hiervoor moet er een warmte- en koude-distributienet (ringleiding) komen om de warmte- en koude-energie van de WKO-bronnen tussen de gebouwen te delen. In het geval dat het gehele gebied voor verwarming en koeling zo min mogelijk met conventionele systemen wil werken, moeten er in variant 1 vijf extra koude bronnen en vijf extra warmtebronnen gerealiseerd worden. Het gebruik van conventionele systemen voor warmte in het gebied daalt dan naar nul, voor koude naar 4.520 MWh (in plaats van 5.324 MWh bij de huidige individuele systemen, een besparing van 17%). Bij variant 2 daalt het gebruik van conventionele systemen voor warmte in het gebied ook naar nul, voor koude naar 3.687 MWh (in plaats van 5.324 MWh bij de huidige individuele systemen, een besparing van 44%). In de toekomst kunnen nieuwe gebouwen in de omgeving ook aangesloten worden op het collectieve WKO-systeem. Hiermee kan het gebruik van conventionele systemen nog verder worden teruggebracht. Om de overige koude-behoefte duurzaam in te vullen kunnen er andere duurzame energie opwekkers gebruikt worden. Wanneer er meerdere gebouwen met een warmtebehoefte in de omgeving zijn (eventueel buiten het onderzochte gebied), die verduurzaamd worden, kunnen deze wellicht ook aansluiten op het collectieve ringnet. Op deze manier kan in de toekomst de koude-behoefte die nog niet wordt ingevuld met het collectieve WKO-systeem wel worden ingevuld. Wanneer er gebouwen met meer warmtebehoefte op het ringnet aansluiten, zal er een extra warmte WKO-bron toegevoegd kunnen worden. De vrijgekomen koude kan gebruikt worden voor verkoeling van andere gebouwen. Het principe is daarmee: hoe meer gebouwen er aangesloten worden op het collectieve WKO-systeem hoe hoger het rendement op gebiedsniveau wordt. Een goede mix van warmte- en koude-vraag is een van de belangrijkste componenten voor een collectief WKO-systeem.

Wanneer de twee varianten worden vergeleken ten opzichte van de nul-variant dan blijkt dat variant 2 de meeste energie-efficiëntie op gebiedsniveau oplevert, maar dat variant 1 makkelijker te realiseren is, met name voor wat betreft leidingen die moeten worden aangelegd en aantallen bronnen die moeten worden geboord.

De inzichten uit deze casestudie zullen in hoofdstuk 6 worden gebruikt om conclusies te trekken ten aanzien van de (on)mogelijkheden van collectieve WKO-systemen.

6 Conclusie

In dit hoofdstuk worden de conclusies getrokken. De verschillende deelvragen komen opnieuw aan de orde, waarna de hoofdvraag wordt beantwoord. Tot slot worden enkele beperkingen van het onderzoek besproken, waarna aanbevelingen voor verder onderzoek worden gedaan.

Deelvraag 1. Wat voor WKO-systemen zijn er?

Uit het literatuuronderzoek is gebleken dat WKO-systemen opgedeeld kunnen worden in twee WKO varianten, gesloten en open WKO-systemen. Gesloten WKO-systemen worden vooral toegepast bij woningen en kleine kantoorpanden. Deze gesloten WKO-systemen slaan de warmte en koude op via lussen in de bodem en het grondwater. Open WKO-systemen zijn onder te verdelen in mono-, doublet- en recirculatiesystemen en gebruiken het grondwater als opslagmiddel voor warmte en koude. Deze open WKO-systemen worden over het algemeen toegepast bij panden en woningen met grotere bruto vloeroppervlaktes.

Deelvraag 2. Wat zijn de ervaringen bij uitgevoerde WKO-projecten in Nederland?

In dit onderzoek is er voor de ervaringen bij uitgevoerde WKO-projecten in Nederland een aantal zaken gebleken.

Individuele WKO-systemen hebben vaak een overschot aan warmte of koude. Door gebouwen met verschillende energiebehoefte in een collectief WKO-systeem te koppelen, kunnen de warmte- of koude-overschotten van het ene gebouw goed benut worden voor energievraag van andere gebouwen. De energie-efficiëntie wordt dan beter. Een goede mix van warmte- en koude-vraag is hierbij van belang. Hierdoor kunnen ook pieken in de warmte- of koude-vraag beter worden opgevangen. De praktijkwaarden wijken nogal eens af van de ontwerpwaarden. Aanloop- en beheerproblemen zijn hier vaak de verklaring voor. In de loop van de tijd worden de praktijkwaarden vaak beter.

De energiewinsten bij collectieve WKO-systemen kunnen groot zijn, zeker wanneer de aanloopproblemen zijn overwonnen. De jaarlijkse gasreductie van de TU Eindhoven en de Radboud Universiteit heeft veel te maken met de collectiviteit van het WKO-systeem (besparing Radboud Universiteit 4% per jaar, TU Eindhoven 5% per jaar). Elke keer wanneer het WKO-systeem uitgebreid wordt gaat het jaarlijkse gasverbruik verder omlaag. Geconcludeerd kan worden dat hoe meer gebouwen aangesloten worden op een collectief WKO-systeem hoe groter de energie-efficiëntie wordt. Het beheer moet wel goed geregeld worden bij een collectief WKO-systeem. Er moet, voor wat betreft wensen en eisen, tussen meerdere partijen afstemming plaatsvinden. Hier kan worden geconcludeerd dat het beter is om één beheerder aan te stellen, omdat individuele gebruikers moeite hebben om een eigen maximale invulling te regelen (voordeel van schaalgrootte).

Deelvraag 3. Welke varianten van WKO-systemen kunnen met elkaar gekoppeld worden?

Geconcludeerd kan worden dat alle open systemen fysiek of thermisch te koppelen zijn.

Open WKO-systemen zijn fysiek of thermisch te koppelen. Voor het koppelen van mono-systemen en doubletsysteem is het belangrijk dat het totale energierendement positief is (veranderingen ΔT /pompcapaciteit). Wanneer systemen een verschillende ΔT hebben en deze systemen worden gekoppeld, zal er voor beide systemen één ΔT ontstaan. Wanneer de ΔT van een systeem lager wordt moet het systeem meer grondwater onttrekken om toch nog de juiste hoeveelheid energie te geven

aan. Wanneer de ΔT voor een systeem groter wordt is er minder grondwater nodig. De benodigde pompcapaciteit van een systeem kan hierdoor veranderen.

Een nieuwe monobron kan in gebieden waar al veel bronnen zijn eenvoudig worden gekoppeld aan doubletbronnen zonder dat het negatieve interferentie veroorzaakt. Dit kan daarmee een oplossing zijn voor het uitbreiden van de WKO-capaciteit. Een recirculatiesysteem is gunstig om te koppelen wanneer er een onbalans is tussen de warmte en koude onttrekking van de bodem. De onttrekkingsbron kan gepositioneerd worden in de overschotbel, waarna de bron vervolgens de koude of warmte onttrekt en deze levert voor een behoefte van een gebouw. Een onbalans kan hiermee omgezet worden in een balans. Verder kan een recirculatie altijd de natuurlijke bodemtemperatuur onttrekken en deze gebruiken voor extra koeling of verwarming. Hierbij moet er wel rekening worden gehouden met het feit dat er meer energie in de warmtepomp gestopt moet worden om de gewenste temperatuur aan het gebouw te leveren.

Deelvraag 4. Op welke onderdelen van een WKO-systeem kan er met een ander WKO-systeem een koppeling worden gemaakt?

Geconcludeerd kan worden dat bij fysiek verbinden van WKO-systemen verbinden via een ringleiding de voorkeur heeft, tenzij gebruikers geen risico's willen lopen. Thermisch koppelen heeft de voorkeur wanneer beheerders verschillende belangen hebben of risico's willen spreiden.

WKO-systemen kunnen fysiek of thermisch met elkaar verbonden worden. Daarbij kan zowel gekozen worden voor een individuele warmtepomp als een collectieve warmtepomp.

Individuele WKO-systemen zijn fysiek te verbinden met een ringleiding tussen de WKO-bronnen. Via deze leidingen kan er direct warmte en koude tussen gebouwen uitgewisseld worden zonder dat het grondwater eerst geïnjecteerd wordt in de WKO-bronnen. Dit levert een besparing op het onttrekken van grondwater en op het inzetten van de waterpompen. Overschotten van WKO-systemen kunnen eenvoudig verspreid worden over de bronnen.

De aansluiting tussen de ringleiding en het gebouw kan worden gerealiseerd via een twee- of een vier-pijpsysteem. Het twee-pijpsysteem wordt toegepast bij een gebouw dat niet gelijktijdig warmte- en koude-behoefte heeft. Een vier-pijpsysteem wordt toegepast bij een gebouw dat gelijktijdig warmte- en koude-behoefte heeft. Een collectieve warmtepomp is het meest gunstig wanneer meerdere gebouwen gelijktijdig dezelfde warmte- of koude-vraag hebben. Een individuele warmtepomp is gunstig wanneer gebruikers van gebouwen zelf de gewenste temperatuur willen bepalen en niet afhankelijk willen zijn van gebruikers in andere gebouwen.

Individuele WKO-systemen kunnen ook via de warmte- of koude-bronnen verbonden worden. Dit thermisch verbinden vraagt organisatorisch goede afstemming met omliggende WKO-systemen. Voor dit thermisch verbinden wordt gekozen wanneer partijen wel de energiewinsten willen delen, maar het beheer van het WKO-systeem in eigen hand willen houden. Zo worden bedrijfsrisico's verminderd.

De meest gewenste manier van koppelen kan bepaald worden via een keuzemenu. Dit keuzemenu kent een aantal variabelen:

- De soort vraag van de gebruikers in het gebied
- De opbouw van de ondergrond
- De risico's die de gebruikers in het gebied willen delen

Op basis van deze variabelen kan het gewenste collectieve WKO-systeem worden opgezet.

Deelvraag 5: op welke wijze kan de energie-efficiëntie in een gebied worden vergroot door het inrichten van een collectief WKO-systeem?

Op grond van de casestudie kan geconcludeerd worden dat energie van gekoppelde WKO-systemen op grotere schaal (met meerdere gebouwen) efficiënter gedeeld en benut kan worden en een reducering van gebruik van conventionele energiebronnen oplevert.

Met de casestudie Zuidas Noord zijn individuele WKO-systemen vergeleken met twee varianten van collectieve WKO-systemen (variant 1: bestaande systemen koppelen met ringleiding, variant 2: geheel nieuw collectief systeem met ringleiding). Het collectieve WKO-systeem brengt, in beide varianten, op gebiedsniveau meer energie-efficiëntie dan de individuele WKO-systemen. Via ringleidingen (warmte en koude) kan de warmte en koude uit de bronnen efficiënter benut worden voor de behoefte van een mix van scholen, kantoren en woningen in het gebied. Deze gebouwen hebben gelijktijdig verschillende warmte- en koude behoeftes. De ringleidingen kunnen de verschillende warmte en koude-behoeftes van de gebouwen gelijktijdig verzorgen. Daarnaast zijn er ook minder bronnen nodig dan wanneer ieder gebouw een eigen individueel WKO-systeem aanschaft. In de toekomst kunnen nieuwe gebouwen in de omgeving ook aangesloten worden op het collectieve WKO-systeem.

Hiermee kan de centrale vraag van dit onderzoek worden beantwoord:

Hoe kan de energie-efficiëntie op gebiedsniveau groter worden door individuele warmte- en koudeopslag te koppelen?

Door individuele WKO-systemen te koppelen in een collectief systeem met ringleidingen kan de energie-efficiëntie op gebiedsniveau vergroot worden. Uit de berekeningen uit de casestudie blijkt dat de warmtebehoefte dan volledig via WKO kan worden ingevuld (100%), terwijl de koude-behoefte grotendeels (72 – 77%) kan worden ingevuld. Door deze collectiviteit worden gebouwen minder afhankelijk van conventionele energiebronnen. Geconcludeerd kan worden dat een goede mix van warmte- en koude-vraag één van de belangrijkste componenten voor een collectief WKO-systeem is. Indien meer gebouwen aangesloten worden op het collectieve WKO-systeem kunnen hogere rendementen behaald worden.

Bij deze conclusie kunnen de volgende kanttekeningen worden geplaatst.

- Een mix van warmte- en koude-vraag is belangrijk, zodat de bodembalans in evenwicht blijft waarmee er een betere verdeling van energie (warmte en koude) ontstaat en een grotere totale invulling van WKO op de totale behoefte ontstaat. Wanneer er onvoldoende mix is van warmte- en koude-vraag heeft een individueel WKO-systeem de voorkeur.
- Wanneer gebouwen die aangesloten zijn op een collectief WKO-systeem een andere functie krijgen, zal de warmte- en koude-behoefte van het gebouw rond dezelfde waarden moeten liggen. Indien de warmte- en koude-behoefte van de nieuwe gebruiker niet dezelfde is, kan het WKO-systeem uit balans raken.
- Bij een collectief WKO-systeem ontstaat er één ΔT voor alle bronnen. Wanneer er een bestaand WKO-systeem op het collectieve WKO-systeem wordt aangesloten dient de pompcapaciteit aangepast te worden in het geval dat het bestaande WKO-systeem een lagere ΔT krijgt (tenzij het andere WKO-systeem de pompcapaciteit kan invullen).

- De druk in de collectieve transportleiding dient op een constante ontwerpwaarde gehouden te worden, zodat het energieverlies van het transport zo laag mogelijk is (net zoals bij individuele transportleidingen).
- De partijen die van het collectieve WKO-systeem gebruik maken moeten goed samenwerken. Het systeem moet namelijk goed beheerd worden. Het beste is als het WKO-systeem door één partij beheerd wordt en dat deze partij het gehele overzicht van het systeem heeft. Wanneer alle partijen die betrokken zijn bij het WKO-systeem zelf warmte- en koude-behoefte willen regelen, kan het voorkomen dat het systeem uit balans raakt. Dit is ook al bij individuele systemen een aandachtspunt. Het is van belang dat er voortdurend gemonitord wordt om te weten of het systeem werkelijk goed werkt en fouten er uit te halen. Op dit moment blijkt dat bij veel systemen niet te gebeuren, waardoor veel gegevens van WKO-systemen ontbreken.

Dit alles leidt tot de volgende aanbevelingen voor verder onderzoek.

- **Onderzoek de mogelijke gebiedsomvang van collectieve WKO-systemen**
In de casestudie is aangenomen dat er bij het transport in het ringnet geen warmteverlies optreedt doordat het grondwater met relatief lage temperaturen wordt getransporteerd en leidingen goed geïsoleerd kunnen worden. Het is interessant om te weten hoe groot de omvang van een collectief WKO-systeem met een ringleidingen kan zijn. Wanneer er bekend is hoe groot het energieverlies per meter is in de leidingen, kan er eenvoudig bepaald worden of het toepassen van een collectief WKO-systeem op een bepaald gebiedsniveau nog rendabel is. De temperatuur van het water, het type isolatie en de buisdiameter hebben hier veel invloed op.
- **Onderzoek de capaciteit van warmtepompen bij collectieve WKO.**
De temperatuur van het water is van invloed op de hoeveelheid water die getransporteerd moet worden. Daarom is interessant om te weten hoe groot de energie-efficiëntie zal zijn wanneer het grondwater op hogere temperaturen wordt getransporteerd (35 – 50°C). Daarmee kan inzichtelijk worden hoe groot de capaciteit van de (collectieve) warmtepomp moet zijn.
- **Onderzoek de mogelijkheid om collectieve WKO-systemen te verbinden met andere duurzame energieopwekkingssystemen.**
In dit onderzoek is er alleen gekeken naar het verbinden van individuele WKO-systemen en niet naar het verbinden van WKO-systemen met andere duurzame energieopwekkingssystemen. Aanbevolen wordt om te onderzoeken of andere duurzame systemen een invulling kunnen geven op de energie-efficiëntie van een gebied. Wellicht dat andere duurzame systemen een aandeel kunnen leveren in verbeteren van de bodembalans. Daarbij komen dan ook gesloten WKO-systemen in beeld.

Tot slot

De producten die dit onderzoek geleverd hebben:

- een keuzemenu voor de optimale koppeling van WKO-systemen in een gebied
- stappenplan voor het ontwerpen van een collectief WKO-systeem
- De casestudie Zuidas Noord waarin individuele WKO-systemen worden vergeleken met twee collectieve WKO-systeem varianten.

Literatuurlijst

- Switch Expert BV. (2017). *Calorische waarde, bovenwaarde en onderwaarde*. Opgehaald van energieleveranciers: www.energieleveranciers.nl
- Adang, E. (2017, April 26). Science Park UvA WKO-systeem. (Facility Services Huisvesting, UvA). (L. Schoemaker, Interviewer)
- Agentschap NL. (November 2011). *Energiezuinig koelen met warmte- en koudeopslag*. Utrecht: RVO.
- Agter, F. (2016). *Scoren met bodemenergie*. Arnhem: Bodemenergienl.
- Arcadis. (2011). *Verkenning interferentiegebieden bodemenergie Haaglanden*. 's-Hertogenbosch: ARCADIS NEDERLAND BV.
- Bloemendal, M., & Mathijssen, H. (2013). *Bodemenergie warm aanbevolen*. Gouda: SKB.
- Bouwmeester, H. (2013). *WKO 3x beter, Lenteakkoord*. Voorburg: Lenteakkoord.
- Broekhuizen, H. (2011). *Gebiedsontwikkeling en WKO*. Baak: Installect.
- Buiting, T. (2013). *Warmte en Koudeopslag op de Radboud Universiteit*. Nijmegen: Universitair Vastgoedbedrijf.
- Buiting, T. (2016). *Energiejaarverslag 2015*. Nijmegen: Radboud Unviersiteit.
- Buiting, T. (2017, Mei 10). Radboud Universiteit WKO-systeem. (Medewerker - Planning & Control, RU). (L. Schoemaker, Interviewer)
- Caljé, R. (2015). *Berekening toekomstige KWO-systemen noordzone Zuidas Amsterdam*. Schoonhoven: Artesia.
- CBS. (2017). *Aandeel hernieuwbare energie 5,9 procent in 2016*. Opgeroepen op 6 4, 2017, van CBS: <https://www.cbs.nl>
- Cremers, R. (2013). *Horizontale bodemwisselaar*. Puth: Technisch Bureau Rene Cremers B.V.
- De Groene Energie Maatschappij. (2016). *Bodemenergie en aardwarmte*. Opgehaald van De Groene Energie Maatschappij: <http://www.dgem.nl/>
- den Dekker, L. (2017, Maart 29). WKO-systemen DWA. (Manager/senior adviseur, DWA). (L. Schoemaker, Interviewer)
- Dienst Ruimtelijke Ordening Amsterdam. (2010). *Uitvoeringsbesluit Fred. Roekstraat*. Amsterdam: Gemeente Amsterdam.
- DVPC B.V. (2017). *Stibbe | Hoofdkantoor*. Opgehaald van dvpc: <http://www.dvpc.nl>
- Ecensy. (2017). *Waar bestaat een WKO-systeem uit?* Opgehaald van Ecensy BV: <http://warmtekoudeopslag.info>
- Energie Platform regio Alkmaar. (2017). *Gesloten bron*. Opgehaald van EPA Alkmaar: <http://www.epalkmaar.nl>
- EnergyPost. (2016, juli 15). *Europe increasingly dependent on oil imports, above all from Russia*. Opgeroepen op juni 5, 2017, van EnergyPost: <http://energypost.eu>
- Everts, A., & Weythingh, K. (2009). *Visie op de ondergrond van Arnhem*. Arnhem: Gemeente Arnhem.
- Geoholland. (2017). *De voordelen*. Opgehaald van GEO Holland BV: www.kensa-warmtepomp.nl
- Google Maps. (2017, Juli 2). Zuidas Amsterdam. Amsterdam.
- Heijboer, P. (2012). *Tomatenkassen verwarmen nieuwbouwwijk*. Bodegraven: DWA.
- Hoefgeest, E. (2016). *Verduurzaming Vastgoed Gemeente Breda*. Opgehaald van KIVI: <https://www.kivi.nl>
- Hoefnagels, N. (2017, April 24). Hydreco WKO-systemen. (Account Sales Manager, Hydreco). (L. Schoemaker, Interviewer)
- Hoogervorst, C. (2009). *De energieneutrale wijk in Nederland*. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven.

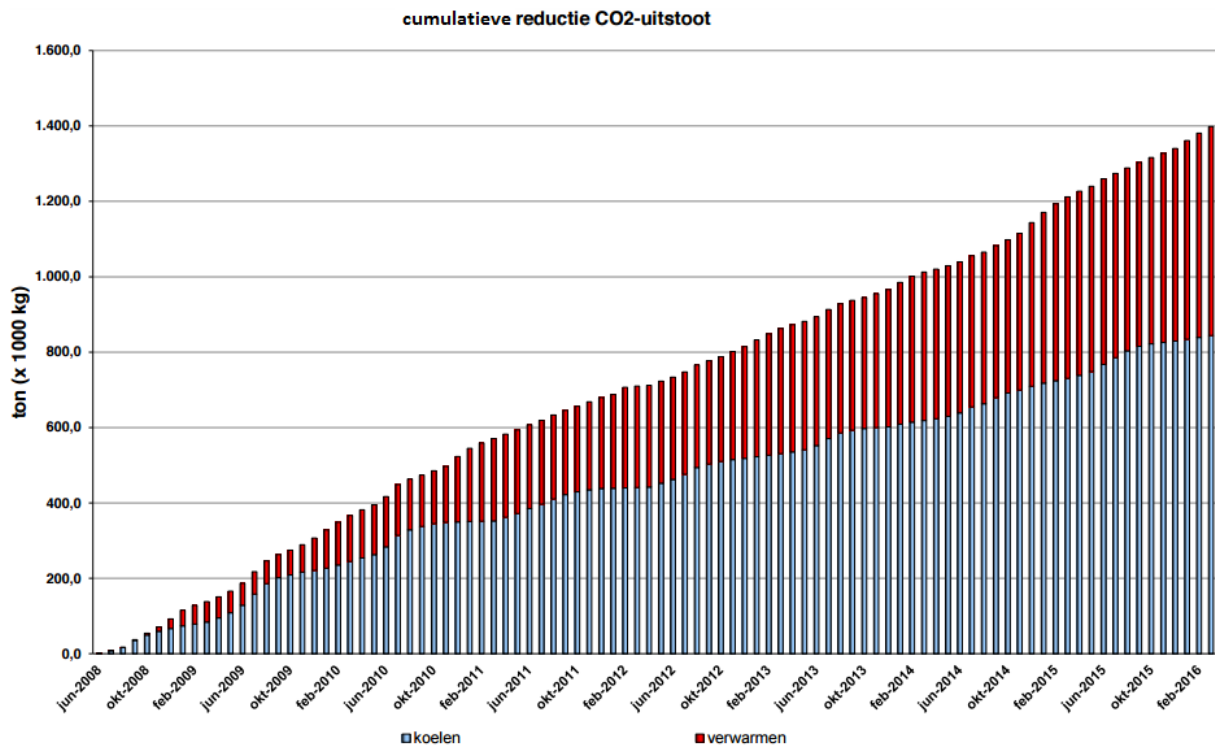
- Hundertmark, T. (2014). Systeem warmte- en koudeopslag. *FMT Gezondheidszorg*, 46-48.
- Hydreco. (2016). *KWO chasserpark Breda*. Breda: Hydreco.
- ICIS. (2017, april 18). *Dutch government plans 10% cut to Groningen gas production*. Opgeroepen op juni 2, 2017, van ICIS: <https://www.icis.com>
- Kennisnetwerk OBN. (2015). *Stroming van grondwater*. Opgehaald van Vereniging van Bos- en Natuurterreineigenaren: <http://www.natuurkennis.nl>
- Meulen, T. (2012). *Energie Efficiency Plan 2013-2016*. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven.
- Meulen, T. (2016). *Management review MeerJaren*. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven.
- Meulen, T. (2016). *Smartgrid Warmte- Koude Opslag TU/e*. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven.
- Meulen, T. (2017, April 18). TU Eindhoven WKO-systeem. (Adviseur energiemangement en gebouwautomatisering, TU Eindhoven). (L. Schoemaker, Interviewer)
- Omgevingsdienst Noordzeekanaalgebied. (2017). *Jaaropgaves WKO-systemen*. Zaandam, Noord-Holland, Nederland: 207.
- Platform Duurzame Huisvesting. (2016, september 14). *Met strakke regie verdient Miele de meerinvestering in 4 jaar terug*. Opgehaald van platformduurzamehuisvesting: <http://www.platformduurzamehuisvesting.nl>
- Provincie Drenthe. (2016, juli 8). *WKO-systemen*. Opgehaald van Provincie Drenthe: <http://www.provincie.drenthe.nl/>
- Radboud Universiteit. (2013, Augustus 13). *Duurzame energie door WKO*. Opgehaald van Radboud Universiteit: <http://www.ru.nl>
- Rijksoverheid. (2017). *Dutch vision on global climate action*. Opgeroepen op june 2017, 4, van Rijksoverheid: <https://www.government.nl>
- Rijksoverheid. (2017). *Rijksoverheid stimuleert duurzame energie*. Opgeroepen op june 4, 2017, van Rijksoverheid: <https://www.rijksoverheid.nl>
- RIVM. (2009). *Warmte Koude Opslag en duurzaam gebruik van de ondergrond*. Bilthoven: RIVM.
- Ruis, G. (2015). *Effectenstudie WKO-systeem*. Amsterdam: G&S Vastgoed B.V.
- RVO. (2016). *Kentalis College Utrecht met bodemenergie*. Opgehaald van RVO: <http://www.rvo.nl>
- RVO. (2016). *VSO Het Kentalis College Utrecht*. Opgehaald van RVO: <http://www.rvo.nl>
- Siemes, J. (2017, Maart 30). *Geocomfort WKO-systemen*. (Sales Engineer, Geocomfort). (L. Schoemaker, Interviewer)
- Slot, P. (2009). *Energiebesparende maatregelen en ondergrondse energieopslag in de praktijk*. Hoevelaken: Unica Ecopower BV.
- Stuurman, R., van Oostrom, N., van Schrojenstein Lantman, R., Goorden, N., Bakr, M., & Doornenbal, P. (2010). *Effecten van wko op de grondwaterkwantiteit*. Delft: Deltares.
- Thijssen, I. (2016). *Ervaringen Utrechtse school met bodemenergie*. Opgehaald van Duurzaam Gebouwd: www.duurzaamgebouwd.nl
- TNO. (2017). *REGIS II: het hydrogeologische model*. Opgehaald van DINOLOKET: <https://www.dinoloket.nl>
- United Nations. (2015). *ADOPTION OF THE PARIS AGREEMENT*. Paris: UNFCCC.
- United Nations. (2017). *UN Climate Change Paris Agreement*. Opgeroepen op juni 3, 2017, van UNFCCC: <http://newsroom.unfccc.int>
- van Beek, H., Doorn, M., & Braakhekke, M. (2012). *Bodemenergieplan Science Park Amsterdam*. Amsterdam: Gemeente Amsterdam.
- van der Korgt, R. (2011). *Energie uit de ondergrond: potenties en kartering*. Utrecht: RVO.

- van Donselaar, C. (2012). *Energieefficiency UvA/HvA versie 1*. Amsterdam: Universiteit van Amsterdam / Hogeschool van Amsterdam.
- van Lieshout, R. (2013). *Case study conform credit MAN 9*. Rotterdam: Dura Vermeer Groep NV.
- Warmtepompplein. (2017). *Warmtepomp werking*. Opgehaald van Warmtepompplein: <https://warmtepompplein.nl>
- Whenham, V. (2012). *Background documenten geothermie*. Brussel: Smart Geotherm.
- Wierikx, R., van Arkel, J., & van Beek, D. (2009). *Geschiktheidskaarten energieopslag*. Middelburg: Provincie Zeeland.
- Willemsen, N. (2016). *Rapportage bodemenergiesystemen in Nederland*. Utrecht: RVO.
- WKO-tool. (2016, mei). *WKO Tool Nederland*. Opgehaald van Rijksoverheid: www.wko-tool.nl
- WTC Amsterdam. (2016). *Home*. Opgehaald van wtcamsterdam: <http://www.wtcamsterdam.com>
- Zuidas. (2015). *Masterplan Warmte Koude Opslag Zuidas Noord*. Amsterdam: Gemeente Amsterdam.

Bijlage 1 Ervaringen met WKO-systemen

Hier worden de bijlages van hoofdstuk 3 aangetroffen van de vijf cases (Miele, GGA, Radboud Universiteit, TU Eindhoven en Science Park UvA). In bijlage 1.1 tot 1.5 zijn grote tabellen, grafieken en berekeningen van de cases weergegeven en in de paragrafen van hoofdstuk 3 wordt er verwezen naar de bijbehorende bijlage.

Bijlage 1.1 Gegevens Miele Nederland B.V.

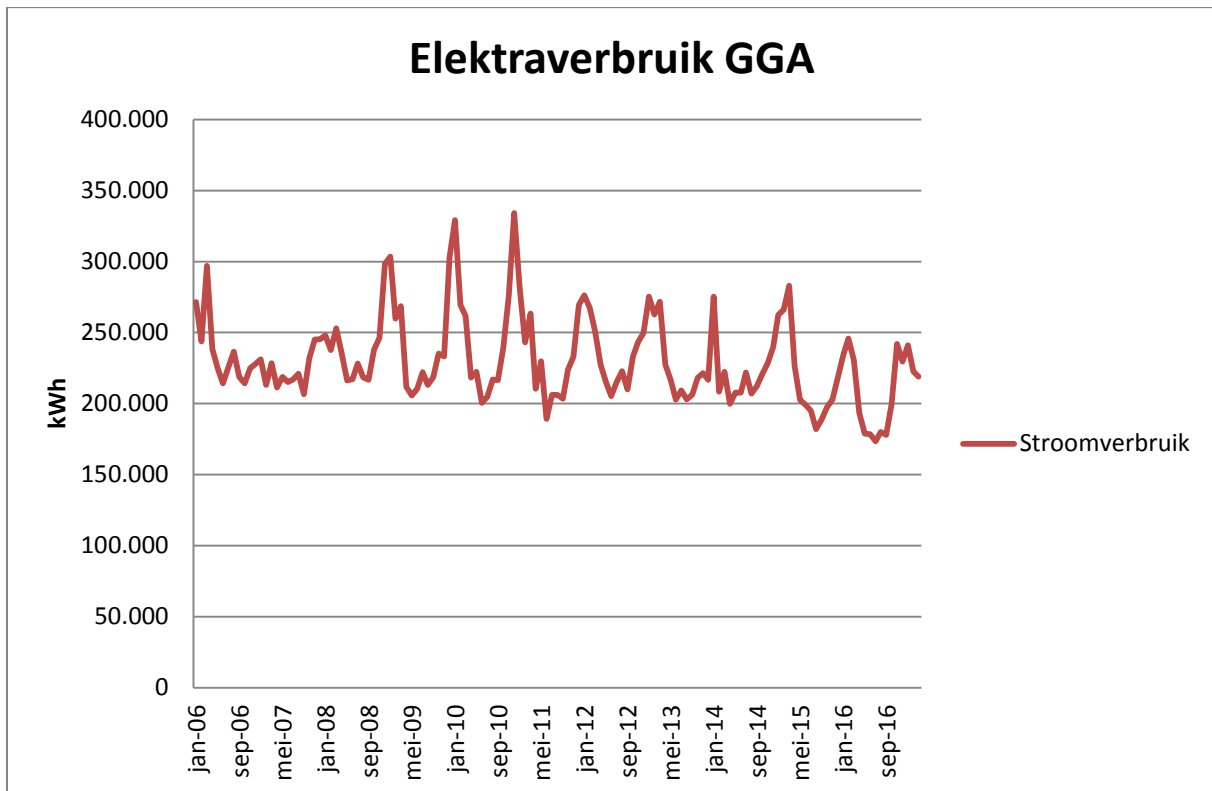


Figuur 72: De cumulatieve CO₂-uitstoot reductie van Miele door het gebruiken van een WKO-systeem.

Bron: (WKO-tool, 2016)

Bijlage 1.2 Gegevens GGA

1.2.1 Gegevens elektra- en gasverbruik GGA



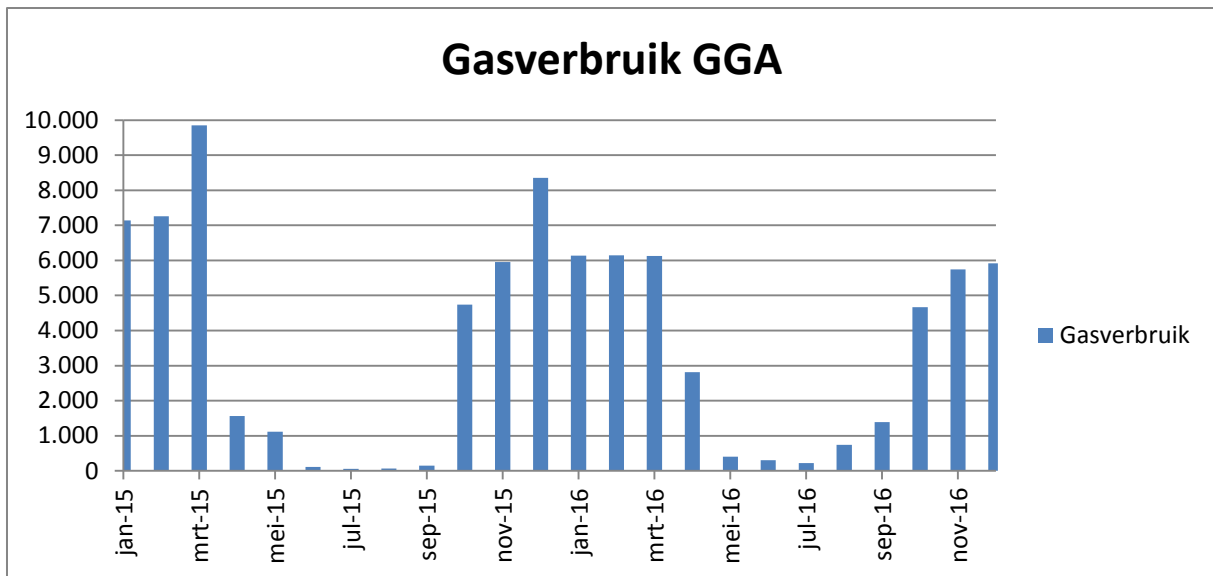
Figuur 73: Grafische weergaven van het elektraverbruik in de periode januari 2006 tot december 2016

Tabel 26: Elektraverbruik per maand van GGA 2015.

2015	jan	feb	mar	apr	mei	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec	totaal
Verbruik (MWh)	262,5	266,2	283,0	226,4	202,5	199,2	195,0	182,1	188,7	197,4	202,9	218,3	2.624

Tabel 27: Elektraverbruik per maand van GGA 2016.

2016	jan	feb	mar	apr	mei	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec	totaal
Verbruik (MWh)	234.1	245.8	230.7	193.5	178.9	178.4	173.6	180.0	178.1	199.7	242.0	229.5	2.464



Figuur 74: Grafische weergaven van het gasverbruik in de periode januari 2015 t/m december 2016 GGA

Tabel 28: Gasverbruik per maand van GGA 2015.

2015	jan	Feb	mrt	apr	mei	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec	Totaal
Verbruik (m³)	7.143	7.256	9.850	1.565	1.114	113	58	70	147	4.739	5.952	8.352	46.359

Tabel 29: Gasverbruik per maand van GGA 2016.

2016	jan	Feb	mrt	apr	mei	jun	jul	aug	sep	okt	nov	dec	Totaal
Verbruik (m³)	6.136	6.144	6.130	2.810	401	301	225	745	1.387	4.663	5.742	5.918	40.602

1.2.2 Jaaropgave WKO-systeem GGA

Tabel 30: Jaaropgave 2014 van WKO-systeem GGA (koeling)

	koelbedrijf (zomer)			
	Onttrokken water (m ³)	Gemiddelde onttrekkings-temperatuur (°C)	Gemiddelde injectie-temperatuur (°C)	Aan bodem toegevoegde warmte (MWh)
2014				
Januari	100	?	4,3	1
Februari	0	?	0,0	0
Maart	3.010	?	2,5	11
April	10.170	?	2,6	29
Mei	17.440	?	2,9	58
Juni	23.140	?	3,8	103
Juli	29.140	?	5,3	182
Augustus	25.070	?	3,6	98
September	24.540	?	3,8	111
Oktober	18.850	?	2,3	4
November	1.830	?	0,0	4
December	0	?	?	0
Totaal/gem.	153.290	?	3,6	644

Tabel 31: Jaaropgave 2014 van WKO-systeem GGA (verwarming)

	Verwarmingsbedrijf (winter)			
2014	Onttrokken water (m ³)	Gemiddelde onttrekkings-temperatuur (°C)	Gemiddelde injectie-temperatuur (°C)	Aan bodem toegevoegde koude (MWh)
Januari	7.300	13,5	?	32
Februari	6.210	13,4	?	24
Maart	4.480	13,2	?	15
April	2.120	12,9	?	7
Mei	1.720	13,6	?	7
Juni	110	14,7	?	1
Juli	0	0,0	?	0
Augustus	0	0,0	?	0
September	0	0,0	?	0
Oktober	1.280	13,6	?	5
November	13.200	13,7	?	58
December	18.640	14,6	?	104
Totaal/gem.	55.060	13,9	?	254

Tabel 32: Jaaropgave 2016 van WKO-systeem GGA (koeling)

	KOELBEDRIJF (ZOMER):					
2016	onttrokken water (m ³)	Gemiddelde onttrekkings-temperatuur (°C)	Gemiddelde injectie-temperatuur (°C)	aan bodem toegevoegde warmte (MWh)	Indicatie geleverde koude WKO (MWh)	Max. Injectie-temperatuur (°C)
januari	?	?	?	0	?	?
februari	?	?	?	0	?	?
maart	?	?	?	9	?	?
april	?	?	?	68	?	?
mei	?	?	?	88	?	?
juni	?	?	?	123	?	?
juli	25.925	9,9	13,8	119	118	2
augustus	34.696	10,6	13,9	130	134	21,6
september	35.713	11,2	14,2	126	125	22,4
oktober	2.959	11,3	13,7	8	8	15,4
november	190	11,8	13,6	0	0	14,7
december	46	10,1	10,3	0	0	14,7
Totaal/gem.	99.529	10,7	14,0	671	386	22

Tabel 33: Jaaropgave 2016 van WKO-systeem GGA (verwarming)

	Maximaal debiet	Stroomverbruik ondergronds deel inclusief warmtepomp (kWh)	SPF	VERWARMINGSBEDRIJF (WINTER)				
				onttrokken water (m ³)	Gemiddelde onttrekkings-temperatuur (°C)	Gemiddelde injectie-temperatuur (°C)	aan bodem toegevoegde koude (MWh)	Indicatie geleverde warmte WKO (MWh)
2016	(m ³ /uur)							
januari	?	?	?	?	?	?	123	?
februari	?	?	?	?	?	?	91	?
maart	?	?	?	?	?	?	42	?
april	?	?	?	?	?	?	9	?
mei	?	?	?	?	?	?	3	?
juni	?	?	?	?	?	?	1	?
juli	?	?	?	61	13,2	11,4	1	0
augustus	?	?	?	299	13,6	10,4	1	1
september	?	?	?	375	13,4	9,9	2	2
oktober	?	?	?	7.528	13,9	9,0	43	43
november	?	?	?	14.886	14,3	8,2	105	106
december	?	?	?	16.502	14,0	8,2	110	112
Totaal/ gem.	?	?	?	39.651	14,1	8,4	527	264

1.2.3 Berekenen van de warmte- en koude-vraag GGA

Gemiddelde jaarlijks elektraverbruik: 2.750 MWh

Gasverbruik in 2016: 40.602 m³

BVO van GGA: 15.700 m² (Dienst Ruimtelijke Ordening Amsterdam, 2010)

Toegevoegde warmte aan bodem WKO: 672 MWh

Toegevoegde Koude aan bodem WKO: 527 MWh

Er kan berekend worden met kengetallen wat de jaarlijkse warmte- en koude-behoefte van een kantoorpand bepaald worden (zie Tabel 34). In de tabel kan het BVO van het kantoorpand ingevuld worden en vervolgens wordt er via bepaalde kengetallen (groen) het warmte en koude behoefte per jaar bepaald (zie kolom 'behoefte/jr').

Om te checken of de kengetallen kloppen, wordt het kantoorpand van GGA gebruikt om te na te gaan of de uitkomst van de warmte- en koude-behoefte per jaar in de buurt van de kengetallen liggen. Het kantoor van GGA heeft een BVO van ca. 15.700 m².

Tabel 34: Overzicht van de berekende warmte- en koude- behoefte GGA

Ontwerp gebouw	BVO m ²	Warmte					
		Aansluitwaarde W/m ²	gelijktijdigheid	vermogen kW	vraag/jr		behoefte/jr
					max kWh/m ²	min kWh/m ²	max MWh
kantoren	15.700	25	75%	294	65	15	1.021
totaal	15.700			294			1.021

Ontwerp gebouw	BVO m ²	Koude					
		Aansluitwaarde W/m ²	gelijktijdigheid	vermogen kW	vraag/jr		behoefte/jr
					max kWh/m ²	min kWh/m ²	max MWh
kantoren	15.700	65	95%	969	40	15	628
totaal	15.700			969			628

Er komt uit dat het gebouw van GGA een warmtebehoefte van ca. 1.021 MWh per jaar heeft en een koude-behoefte van ca. 628 MWh per jaar. Nu wordt er gekeken of dit werkelijk zo is. Zo niet zullen de kengetallen die in de tabel staan aangepast worden om tot goede waarden te komen.

In Tabel 35 is het gasverbruik, warmte en koude levering van WKO, levering warmte warmtepomp en het totale warmteverbruik van het GGA kantoor weergegeven. Een deel van de gegevens zijn al besproken in paragraaf 3.3.2, maar er zijn een aantal gegevens toegevoegd.

In juli 2016 is de maand met het minste gasverbruik. Er wordt aangenomen dat het gasverbruik (225 m³) van deze maand niet gebruikt wordt voor verwarming, maar alleen voor warmtapwater en andere voorzieningen (koken, ect.). Om tot een uitkomst te komen wordt er aangenomen dat er bij iedere maand van het jaar 225 m³ gas wordt gebruikt voor warmtapwater en andere voorzieningen. De rest van het gasverbruik is voor het verwarmen van het gebouw.

In de derde rij van de tabel is bij iedere maand het gasverbruik van de maand juli er afgehaald. Dit is het maandelijkse gasverbruik voor het verwarmen van het gebouw. Omdat de totale warmtevraag van een gebouw altijd in MWh wordt berekend, moet het gasverbruik van m³ omgezet worden naar MWh. In Nederland is voor aardgas een calorische bovenwaarde vastgesteld. Dit is de hoeveelheid energie die bij aardgas vrijkomt tijdens een volledige verbranding. Eén m³ aardgas heeft een bovenwaarde van 35,17 MJ (Switch Expert BV, 2017). De één m³ wordt als volgt omgezet naar MWh:

$$1 \text{ kWh} = 3,6 \text{ MJ}$$

$$\frac{35,17 \text{ MJ}}{3,6 \text{ MJ}} = 9,7694 \text{ kWh} = 9,7694 \times 10^{-3} \text{ MWh}$$

Geeft

$$1 \text{ m}^3 = 9,7694 \times 10^{-3} \text{ MWh}$$

Het m³ gasverbruik per maand is naar MWh omgezet in rij vier van de tabel.

De vijfde en achtste rij van de tabel laat de warmte en koude levering van de WKO per maand zien. In paragraaf 3.3.2 was de toegevoegde warmte en koude aan de bodem, onttrekkingstemperatuur,

injectietemperatuur en onttrokken water per maand al aanbod gekomen (zie ook bijlage 1.2.2). Met deze waardes kan de geleverde warmte en koude worden bepaald. Deze wordt bepaald door:

$$Q_{w/k \text{ onttrokken}} = V \times (T_o - T_i) \times C_z$$

Waarin:

$Q_{w/k \text{ geleverd}}$ = De onttrokken warmte of koude uit bodem (kWh)

V = Onttrokken water (m^3)

$\Delta T = T_o - T_i$ = Gem. onttrekkingstemperatuur – gem. injectietemperatuur (K)

C_z = Warmtecapaciteit grondwater (1,16789 kWh/ $m^3 \cdot K$)

De warmtecapaciteit van het grondwater is 1,167 kWh/ $m^3 \cdot K$ ($1,16789 \times 10^{-3}$ MWh/ $m^3 \cdot K$). De warmtecapaciteit is een constante waarden water en zegt iets over hoeveel energie erbij 1 m^3 en 1 graden zit. In Tabel 32 en Tabel 33 is de jaaropgave 2016 van het WKO-systeem van GGA te zien, inclusief de geleverde warmte en koude aan de warmtepomp/gebouw. Tussen de toegevoegde warmte aan de bodem en de geleverde warmte zit maar een klein verschil. Dit verschil kan in de constante zitten van de warmtecapaciteit of de gemiddelde temperaturen. Wellicht dat GGA een andere constante waarde heeft gebruikt. Wat aannemelijk is, is dat er in de gemiddelde onttrekkings- en injectie-temperatuur een afwijking zit, waardoor de uitkomsten iets hoger liggen. Voor de geleverde warmte en koude aan het gebouw wordt er uitgegaan van de waardes 'toegevoegde warmte aan bodem'.

De energievraag van de warmtepomp en het rendement (COP) is niet bekend. Om toch een idee te krijgen hoeveel warmte de warmtepomp levert voor het gebouw is er aangenomen dat de warmtepomp een COP-waarde heeft van 4,5. Deze COP-waarde is een veel voorkomende rendementswaarden van warmtepompen. In de laatste kolom van de zesde rij is de geleverde warmte die van de warmtepomp komt weergegeven. Onder deze kolom staat de totaal geleverde warmte van alle systemen bij elkaar (1.048 MWh). Deze berekende warmte komt goed overeen met de uitkomst van de berekeningen met de kengetallen.

Tabel 35: Gasverbruik GGA en de geleverde warmte en koude van het WKO-systeem

	jan-16	feb-16	mrt-16	apr-16	mei-16	jun-16	jul-16	aug-16	sep-16	okt-16	nov-16	dec-16	Totaal 16
Totaal gas verbruik (m^3)	6.136	6.144	6.130	2.810	401	301	225	745	1.387	4.663	5.742	5.918	40.602
Verbruik verwarming (m^3)	5.911	5.919	5.905	2.585	176	76	0	520	1.162	4.438	5.517	5.693	37.902
Verbruik (MWh)	58	58	58	25	2	1	0	5	11	43	54	56	370
Geleverde warmte WKO zonder WP (MWh)	123	91	42	9	3	1	0	1	2	43	105	110	527
Geleverde warmte WKO met COP 4,5 (MWh)													678
Geleverde warmte met WKO, WP en Gas (MWh)													1.048
Geleverde koude WKO (MWh)	0	0	9	68	88	123	119	130	126	8	0	0,0	672

Bijlage 1.3 Gegevens Radboud Universiteit

Tabel 36: Overzicht van energieverbruik in de periode 2008 tot en met 2015 Radboud Universiteit

Energieverbruik Radboud Universiteit	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
aardgas (m ³ /jaar)	3.804.765	3.313.634	3.776.362	3.114.499	3.421.341	3.147.191	2.383.073	2.513.058
Aardgas temperatuur gecorrigeerd (m ³ /jaar)	3.721.701	3.243.372	3.203.815	3.300.510	3.334.886	2.917.131	2.758.263	2.662.216
elektriciteit (MWh/jaar)	33.732	34.562	34.734	35.492	34.990	35.598	35.501	35.848
Elektriciteit temperatuur gecorrigeerd (MWh/jaar)	35.105	35.176	34.392	37.806	35.415	35.141	35.949	35.333
CO2-emissie (ton/jaar)	29.391	29.189	30.016	29.359	29.545	29.486	28.056	28.529
primaire energie (GJ/jaar)	424.160	417.584	432.312	418.300	423.206	420.250	395.066	402.428
primaire energie (gas. corr.) (GJ/jaar)	421.531	415.361	414.191	424.187	420.470	412.969	406.941	407.149
primaire energie (alles corr.)	433.891	420.891	411.120	445.018	424.295	408.860	410.977	402.527
Gebouw-oppervlak (m ²)	287.956	287.956	287.956	286.807	302.385	300.977	317.350	323.474

Bron: (Buiting, 2016)

Bijlage 1.4 Gegevens TU Eindhoven

Tabel 37: Elektra- en gasverbruik van de gebouwen die aangesloten zijn op het WKO-systeem

Naam gebouw	BVO (m ²)	Elektra 2013 (MWh)	Elektra 2014 (MWh)	Elektra 2015 (MWh)	Gasverbruik 2013 (m ³)	Gasverbruik 2014 (m ³)	Gasverbruik 2015 (m ³)
Sportcentrum	9.685	1.140	1.130	1.138	170.788	128.149	127.471
Auditorium	14.803	1.397	1.437	1.391	197.999	304.442	295.563
Ceres	0	224	104	99	0	0	0
MetaForum	28.434	3.176	2.822	2.953	0	0	0
Vertigo	26.068	2.325	2.527	2.200	78.315	67.326	60.000
Matrix	6.884	1.041	992	709	180.000	150.455	149.961
Helix	29.912	7.023	6.794	6.355	349.409	310.025	310.043
Flux	29.630	GBN	GBN	2.183	GBN	GBN	0
Cyclotron	11.850	3.282	3.169	3.035	47.580	13.376	33.510
Spectrum	7.757	3.659	3.234	3.361	274.469	223.269	223.625
Gemeni Zuid	20.744	1.880	2.589	2.705	562.865	341.401	375.807
Gemeni Noord	12.712	1.032	867	1.748	537.740	332.000	362.592
Laplace	11.708	2.699	2.597	2.915	122.615	127.596	158.996
Kennispoort	12.384	1.001	868	828	82.315	58.515	86.683
totaal	222.571	29.878	29.129	31.621	2.604.095	2.056.554	2.184.251
WKO		932	905	860	0	0	0
Elektraverbruik WKO		3,12%	3,11%	2,72%			

Toelichting: GBN = gebouw bestaat nog niet

Bron: (Meulen, 2016)

Tabel 38: Warmte en koude levering van WKO-systeem aan de gebouwen

Naam gebouw	Water- verbruik in 2013 (m ³)	Water- verbruik in 2014 (m ³)	Water- verbruik in 2015 (m ³)	WKO warm in 2013 (MWh)	WKO warm in 2014 (MWh)	WKO warm in 2015 (MWh)	WKO koud in 2013 (MWh)	WKO koud in 2014 (MWh)	WKO koud in 2015 (MWh)
Sportcentrum	13.811	13.830	14.048	184	277	384	0	0	0
Auditorium	3.533	3.642	3.288	208	123	122	211	209	190
Ceres	1.047	1.096	393	48	39	41	28	59	27
MetaForum	5.584	6.551	7.779	379	207	232	321	390	465
Vertigo	3.101	3.526	3.151	588	508	611	350	276	303
Matrix	923	966	1.237	436	207	220	675	818	598
Helix	44.296	42.521	41.308	2.760	2.180	2.476	1.140	1.139	920
Flux	GBN	GBN	5.412	GBN	GBN	1.246	GBN	GBN	796
Cyclotron	1.476	1.434	2.391	1.574	1.243	1.271	1.547	1.586	1.708
Spectrum	31.121	31.623	38.308	66	18	47	2.737	3.088	2.538
Gemeni Zuid	17.597	17.174	15.889	704	1.069	942	1.167	1.130	1.018
Gemeni Noord	1.590	1.500	1.798	131	181	196	100	180	581
Laplace	1.271	841	1.831	13 (kWh)	3 (kWh)	7 (kWh)	191	190	190
Kennispoort	1.706	1.661	1.550	0	0	0	254	207	214
Totaal				7.078	6.053	7.789	8.721	9.272	9.547
WKO	8.516	11.979	4.142						

Toelichting: GBN = gebouw bestaat nog niet

Bron: (Meulen, 2016)

Bijlage 1.5 Gegevens Science Park UvA

Tabel 39: Jaargegevens 2011 WKO-systeem Science Park UvA (thermisch verbonden systeem)

2011	Energie toegevoerd aan WKO			Energie geleverd door WKO		
	Gas (m ³)	Gas primair (MWh)	Elektriciteit (MWh)	Elektriciteit (MWh)	Warmte (MWh)	Koude (MWh)
Jan	18.765	165	327	328	671	360
Feb	9.764	86	276	276	671	360
Mrt	7.819	69	2.530	253	671	564
Apr	2.428	21	229	229	671	564
Mei	3.117	28	164	164	671	564
Jun	1.185	11	123	123	229	990
Jul	1.280	11	112	112	140	705
Aug	1.151	10	80	80	140	705
Sept	1.302	11	89	89	170	750
Okt	3.904	34	135	135	347	368
Nov	6.820	60	185	185	615	223
Dec	9.588	84	210	210	768	194
Totaal	67.123	590	2.184	2.184	5.767	6.347

Bron: (van Donselaar, 2012)

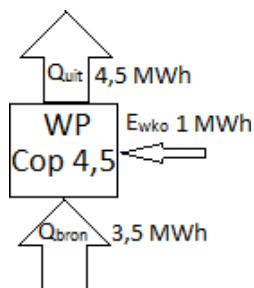
Bijlage 2 Casestudie Zuidas Noord

Hier zijn de bijlagen van hoofdstuk 5 opgenomen. In bijlage 2.1 wordt de uitleg van de berekeningen behandeld, in bijlage 2.2 de toelichting op de ontwerpwaarden en in bijlage 2.3 de toelichting op de ringleiding. In de paragrafen van hoofdstuk 5 wordt er verwezen naar de bijbehorende bijlage.

Bijlage 2.1 Uitleg berekeningen

1. Berekenen COP Warmtepomp en warmte levering warmtepomp (warmtepomp formule)

In Figuur 75 is het principe van een COP-waarde schematisch weergegeven (zie paragraaf 2.5.6 voor uitleg).



Figuur 75: Principe van COP-waarde

Voor het Atrium zijn de gegevens van de geleverde energie door het WKO-systeem aan het gebouw bekend. Ook is het energieverbruik van het WKO-systeem bekend. De COP wordt als volgt berekend:

$$COP = \frac{Q_{uit}}{E_{wko}} = \frac{3.250 \times 10^{-3}}{890 \times 10^{-3}} = 3,7$$

Waarin:

Q_{uit} = Geleverde energie door het WKO-systeem (kWh)

E_{wko} = Energieverbruik van het WKO-systeem (kWh)

De COP-waarde is daarmee bekend. Met de boven- genoemde gegevens kan ook de onttrokken warmte uit de bodem berekend worden. Zie formule hieronder:

$$Q_{bron} = Q_{uit} - E_{wko} = 3.250 \times 10^{-3} - 890 \times 10^{-3} = 2.360 \times 10^{-3} \text{ kWh} = 2.360 \text{ MWh}$$

Waarin:

Q_{uit} = Geleverde energie door het WKO-systeem (kWh)

E_{wko} = Energieverbruik van het WKO-systeem (kWh)

Q_{bron} = Onttrokken warmte uit bodem (kWh)

Om te berekenen hoeveel warmte de warmtepomp kan leveren aan het gebouw, wordt de volgende formule gehanteerd:

$$Q_{uit} = COP \times E_{wko} = 4,5 * 1 = 4,5 \text{ kWh}$$

Waarin:

Q_{uit} = Geleverde energie door het WKO-systeem (kWh)

E_{wko} = Energieverbruik van het WKO-systeem (kWh)

2. Berekenen onttrokken warmte en koude (warmte formule)

In de digitale bijlage "Jaaropgaves WKO-systemen WTC, AKZO, St. Nicolaaslyceum" zijn de toegevoegde warmte en koude aan de bodem, onttrekkingstemperatuur, injectietemperatuur en onttrokken water per maand te zien. Hoeveel warmte en koude een WKO-systeem onttrekt uit de bodem wordt als volgt berekend. Met deze waarden kan de geleverde warmte en koude worden bepaald. De formule is als volgt:

$$Q_{w/k \text{ onttrokken}} = V \times (T_o - T_i) \times C_z$$

Waarin:

$Q_{w/k \text{ geleverd}}$ = De onttrokken warmte of koude uit bodem (kWh)

V = Onttrokken water (m^3)

$\Delta T = T_o - T_i$ = Gem. onttrekkingstemperatuur – gem. injectietemperatuur (K)

C_z = Warmtecapaciteit grondwater (1,16789 kWh/ $m^3 \cdot K$)

Toelichting: De warmtecapaciteit van het grondwater is 1,167 kWh/ $m^3 \cdot K$ ($1,16789 \times 10^{-3}$ MWh/ $m^3 \cdot K$). De warmtecapaciteit is een constante waarde voor grondwater (zoutwater) en geeft een indicatie over hoeveel energie onttrokken kan worden uit 1 m^3 en 1 kelvin.

3. Berekenen benodigde pompcapaciteit (pompcapaciteit formule)

De vier bestaande WKO-systemen hebben allen een bepaalde pompcapaciteit voor het onttrekken van het grondwater én om de koude en warmte te kunnen leveren aan het gebouw. Voor de herontwikkelingsgebouwen met WKO-systemen is de benodigde pompcapaciteit nog niet bekend. De benodigde pompcapaciteit voor de bronnen van de herontwikkelingsgebouwen en het collectieve WKO-systeem is afhankelijk van de waarden van het benodigde vermogen en de ΔT van het WKO-systeem. Daarnaast hebben constanten ook nog invloed op de benodigde pompcapaciteit. De benodigde pompcapaciteit voor warmte en koude verschillen, omdat er voor koude en warmte allebei een ander vermogen nodig is. Met de volgende formule kan de benodigde pompcapaciteit van een WKO-systeem berekend worden:

$$Q_{\text{pomp, benodigd}} = \frac{P}{\rho_z \times C_z \times \Delta T}$$

Waarin:

$Q_{\text{pomp, benodigd}}$ = Benodigde pompcapaciteit (m^3 /uur)

P = Benodigd vermogen (kW)

ρ_z = Dichtheid grondwater (kg/m^3)

C_z = Warmtecapaciteit grondwater (1,16789 kWh/ $m^3 \cdot K$)

$\Delta T = T_o - T_i$ = Gem. onttrekkingstemperatuur – gem. injectietemperatuur (K)

Het aantal benodigde bronnen is afhankelijk van het ontwerp van de pompcapaciteit per bron. Voor de herontwikkelingsgebouwen met een individueel WKO-systeem is er per gebouw een verschillende pompcapaciteit ontworpen. Bij het collectief WKO-systeem wordt er gekozen voor één pompcapaciteit voor alle bronnen die nog niet bestaan.

$$\text{Aantal bronnen: } \text{Aantal bronnen} = \frac{Q_{\text{pomp, benodigd}}}{Q_{\text{pomp}}}$$

4. Berekenen maximale thermische invloedgebied van de bellen (invloedgebied formule)

Door het onttrekken van bepaalde hoeveelheden water van bepaalde temperatuur ontstaat er een invloed gebied. De grenzen zijn als volgt te berekenen:

$$V_{\text{grond}} = \frac{Q_{\text{behoefte}}}{B} \times \frac{1}{C_{\text{zw}}} \times \frac{1}{\Delta T} \times \frac{1}{\eta}$$

Waarin:

V_{grond} = Grondvolume per bel (m^3)

Q_{behoefte} = Warmte- of koude- behoefte van het gebouw (kWh)

B = Aantal bronnen (-)

$\Delta T = T_o - T_i$ = Gem. onttrekkingstemperatuur – gem. injectietemperatuur (K)

C_{zw} = Warmtecapaciteit grondwater ($1,16789 \text{ kWh/m}^3 \cdot \text{K}$)

η = Porositeit in de aquifer van zand (35%)

Het grondvolume (grens) wordt nog gecorrigeerd op geleidingsverlies en stroomsnelheden. Hiervoor is een correctiefactor van 0,018 gekozen. Het gecorrigeerde grondvolume kan omgezet worden naar een bereik (straal):

$$O = \sqrt{\frac{V_{\text{grond}}}{\frac{L_{\text{filter}}}{\pi}}}$$

Waarin:

O = Oppervlakte bel (m^2)

V_{grond} = Grondvolume per bel (m^3)

L_{filter} = Filterlengte (m)

Vervolgens:

$$r = \sqrt{\frac{O}{\pi}}$$

Waarin:

r = straal bel (m)

O = Oppervlakte bel (m^2)

Bij het thermisch invloedgebied van een bel heeft de filterlengte ook invloed op het bereik van de bel. Hoe korter de filterlengte van de bron wordt hoe groter het bereik (in horizontaalvlak).

5. Berekenen van de bodembalans (bodembalans formule)

De bodembalans worden eenvoudig berekend door de koude (behoefte, onttrekking, toevoeging) van de warmte (behoefte, onttrekking, toevoeging) af te trekken.

Daarnaast kan er voor de onttrokken en toegevoegde energie aan de bodem een percentage balans worden bepaald. Dit percentage, oftewel de relatieve energiebalans van de bodem, wordt als volgt bepaald (Willemsen, 2016):

$$E_{\text{balans}} = \frac{Q_{\text{warmte}} - Q_{\text{koude}}}{Q_{\text{koude}} + Q_{\text{warmte}}}$$

Waarin:

E_{balans} = Balans (%)

Q_{warmte} = Hoeveelheid warmte die wordt toegevoegd of onttrokken (kWh)

Q_{koude} = Hoeveelheid koude die wordt toegevoerd of onttrokken (kWh)

Bij een positieve balans is er meer warmte toegevoegd aan de bodem dan koude. Als de balans negatief is er meer koude toegevoegd aan de bodem.

Bijlage 2.2 Ontwerpwaarden

Onder de belangrijke ontwerpwaarden van WKO-systemen in deze casestudie vallen de pompcapaciteit per bron, ΔT en filterlengtes van de bronnen. Voor de bestaande gebouwen met WKO-systemen zijn de ontwerpwaarden bekend, maar voor de herontwikkelingsgebouwen met WKO-systemen en het toekomstige collectieve WKO-systeem zullen de ΔT met uitgangspunten bepaald worden.

In Tabel 40 zijn de ontwerpwaarden weergegeven. Uit het 'Masterplan WKO Zuidas Noord' zijn de pompcapaciteiten en filterlengtes voor de WKO-systemen van WTC, AKZO/Stibbe en St. Nicolaaslyceum gehaald. De ΔT van deze WKO-systemen zijn gebaseerd op de jaaropgaves van 2016. De gemiddelde ΔT is als uitgangspunt gekozen. Voor het Atrium zijn de gegevens weer uit de 'Effectenstudie WKO-systeem' genomen. Het thermisch invloedgebied (bereik, twee rechte kolommen) van de bronnen zijn berekend met de invloedgebied formule uit Bijlage 2.1 Uitleg berekeningen.

Tabel 40: Ontwerpgegevens van WKO-systemen van de bestaande gebouwen

Gebouwen met bestaande WKO	Aantal bronnen (Koud en warm)	Pompcapaciteit warmte per bron (m ³ /uur)	Pompcapaciteit koude per bron (m ³ /uur)	Gemiddelde ΔT (°C)	Filterlengte warmte (m)	Filterlengte koud (m)	Bereik koude bel (m)	Bereik warmte bel (m)
WTC	1	191	191	6	62	62	93	98
AKZO/Stibbe	2	175	175	5,3	60	60	43	38
St. Nicolaaslyceum	1	40	40	3,8	35	17	50	48
Atrium	3	125	125	11,0	60	60	42	41

De grootte van de ΔT van de individuele WKO-systemen van de herontwikkelingsgebouwen wordt beïnvloed door de bronnen met hetzelfde thermische type (warmte of koude). Als WKO-systemen thermisch niet worden beïnvloed door andere WKO-systemen is als uitgangspunt genomen dat het WKO-systeem een ΔT van 6°C heeft. Wanneer bronnen met hetzelfde thermische type elkaar thermisch beïnvloeden stijgt de ΔT maximaal met 3°C. De positionering van de individuele WKO-systemen heeft dus veel invloed op de ΔT . De individuele WKO-systemen van de herontwikkelingsgebouwen zullen hoogstwaarschijnlijk in de buurt van het gevoede gebouw geplaatst worden, zodat de afstand tussen het individuele WKO-systeem en het gebouw niet te groot hoeft te zijn.

In Tabel 41 zijn de ΔT 's van deze individuele WKO-systemen en de uitkomsten van de ontwerpwaarden opgenomen. De ontwerpwaarden van de pompcapaciteiten per bron zijn ontworpen op de minimale benodigde capaciteit. Bij de rechtbank is er voor 2 koude en warmtebronnen gekozen, omdat de pompcapaciteit per bron anders te groot wordt voor één doublet.

Tabel 41: Ontwerpgegevens van individuele WKO-systemen van de herontwikkelingsgebouwen

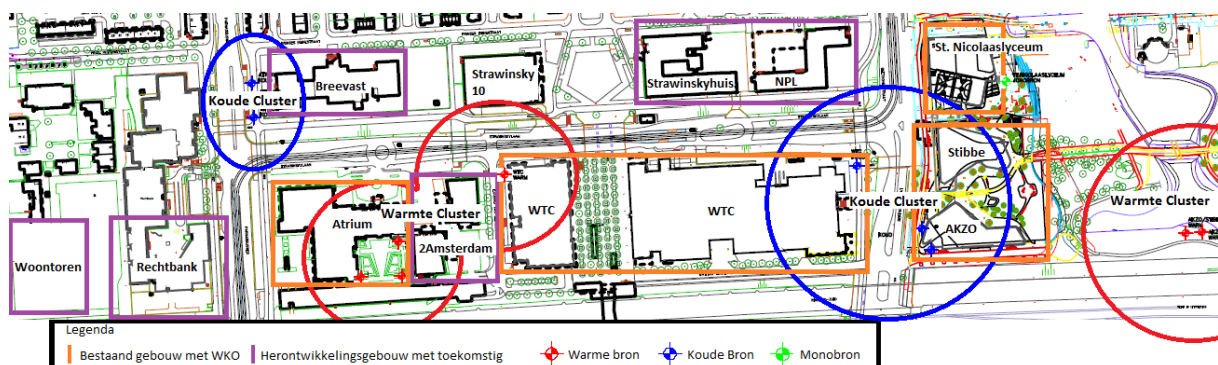
Herontwikkelingsgebouw met WKO	ΔT (°C)	Aantal bronnen* (Koud en warm)	Pomp-capaciteit koud per bron* (m ³ /uur)	Pomp-capaciteit warm per bron* (m ³ /uur)	Filter-lengte (m)	Bereik koude bel* (m)	Bereik warmte bel* (m)
Rechtbank	7	2	147	91	60	53	53
2Amsterdam	8	1	134	105	60	47	47
Breevast	7	1	82	94	60	45	45
NPL Strawinskyhuis	6	1	88	113	60	42	42
Woontoren	7	1	125	161	60	51	51

Toelichting: * Berekend met formules in Bijlage 2.1 Uitleg berekeningen.

Voor een collectief WKO-systeem is het gunstig als de WKO-bronnen in clusters geplaatst worden. In het gebied Zuidas Noord zijn er op dit moment eigenlijk twee koude clusters en twee warmte clusters (zie Figuur 76). De WKO-bronnen van het collectieve systeem worden in de clusters gepositioneerd met hetzelfde thermische type (warmte- of koude-bron). Hierdoor kan er positieve interferentie ontstaan. Voor het collectieve WKO-systeem wordt er uitgegaan dat deze een ontwerp ΔT heeft van 7°C. Dit is ook het ontwerp waarden van het collectieve WKO-systeem bij de TU Eindhoven. In Tabel 42 zijn de ontwerpwaarden weergegeven.

Tabel 42: Ontwerpgegevens van het collectief WKO-systeem

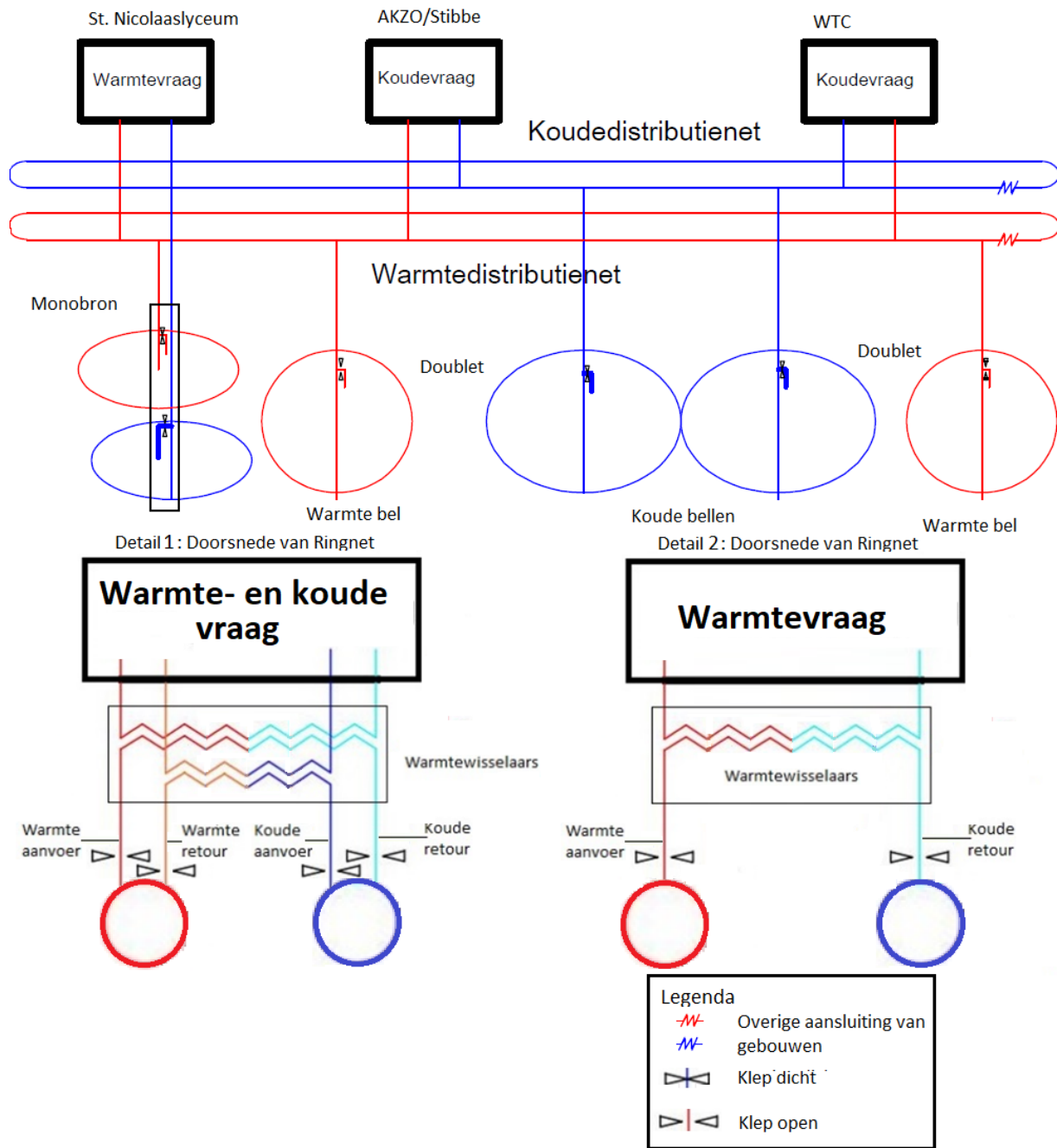
	ΔT (°C)	Filterlengte (m)
Collectief WKO	7	60



Figuur 76: Vier thermische clusters in het gebied

Bijlage 2.3 Collectieve WKO-systeem ontwerpen: toelichting ringleiding

Alle WKO-bronnen in het gebied worden aangesloten op een warmte en koude ringleiding. Het verloop van de ringleiding is te zien in Figuur 66 (variant 1) en Figuur 69 (variant 2) (zie Figuur 77 voor een principe en details van de ringleiding). De ringleiding zorgt er voor dat energie uit warmte en koude bronnen met meerdere gebouwen gedeeld kan worden. Dit maakt het mogelijk om de gebouwen zo volledig mogelijk op WKO-systemen te laten koelen en verwarmen. De ringleiding bestaat uit een warmtedistributienet en een koude-distributienet. Voor de aansluiting van de ringleiding met de gebouwen kunnen er twee (detail 2) of vier (detail 1) leidingen toegepast worden. Via één of twee warmtewisselaars kan apart de warmte en koude van het grondwater afgegeven worden aan het gebouw. Hierna stroomt het warmte of koude water terug naar de ringleiding en wordt het weer geïnjecteerd in een bron of direct uitgewisseld met een ander gebouw. Via kleppen wordt er geregeld of er warm of koud water wordt aangevoerd of afgevoerd (zie detail in Figuur 77). Welke kleppen openstaan ligt aan de behoefte van het gebouw op dat moment.



Figuur 77: Principe en doorsnede van de ringleiding

Toelichting: Principe van de ringleiding (boven) en details van de overdracht via de warmtewisselaar (links en rechts onder).