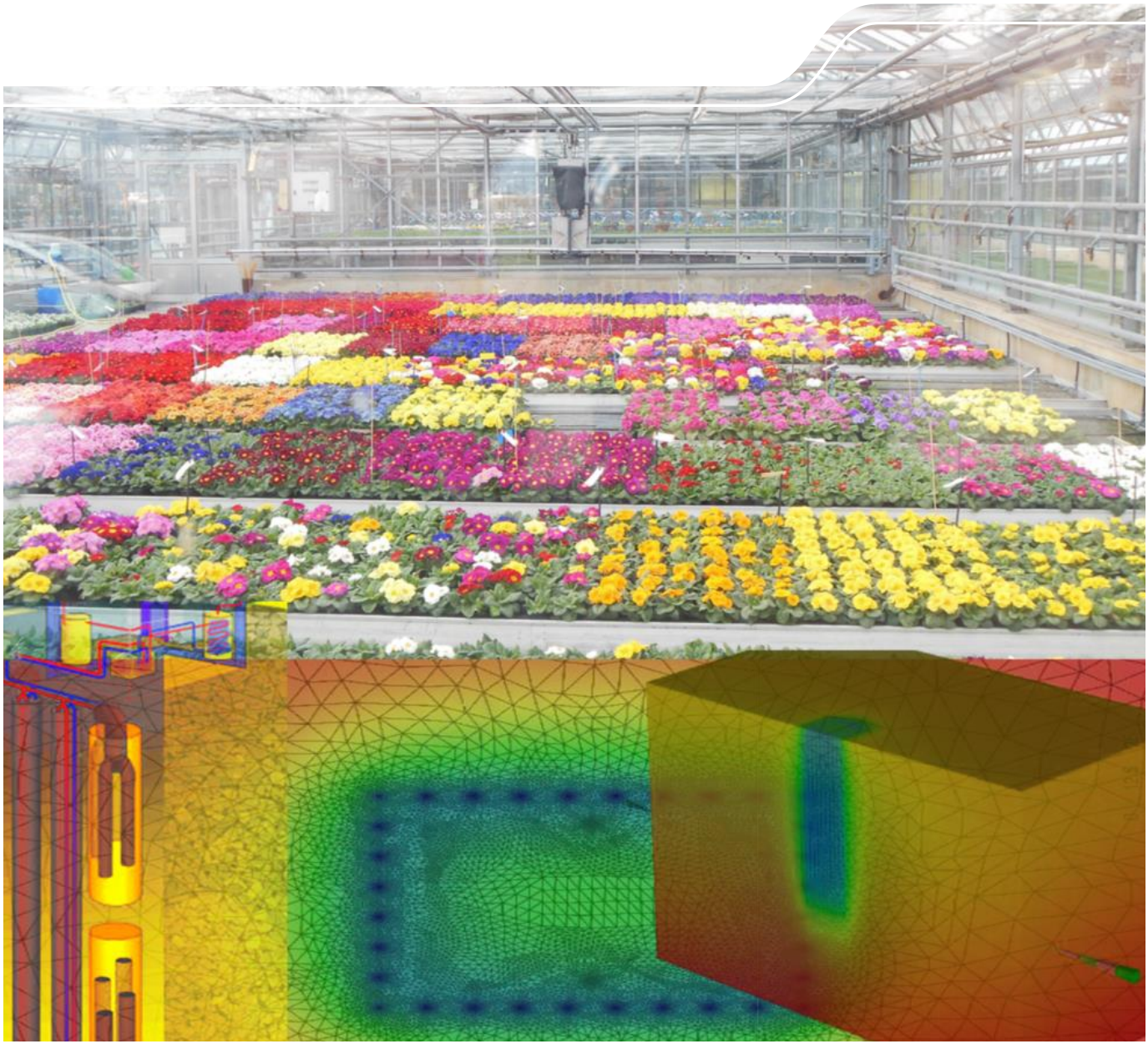
LANDESAMT FÜR UMWELT,
LANDWIRTSCHAFT
UND GEOLOGIE

Freistaat
SACHSEN

# Geothermienutzung in sächsischen Gartenbaubetrieben

Schriftenreihe, Heft 6/2015



# Möglichkeiten der Wärmeversorgung von sächsischen Gartenbaubetrieben mit Geothermie in Abhängigkeit von geologischen Standortfaktoren und verschiedenen Betriebsstrukturen/ Nutzungskonzepten

Marcus Richter, Dr. Christian Huber, Katrin Reinhardt,
Hendrik Wachmann, Axel Gerschel

Inhalt


**1 Projektskizze ..... 15**
**2 Charakteristik der Betriebsstrukturen ..... 17**
2.1 Modellbetrieb A – historisch gewachsene Einzelhandelsgärtnerei (Zierpflanzenbau) ..... 17
2.2 Modellbetrieb B – Spezialisierter Gemüsebaubetrieb (Tomaten/Gurken) ..... 17
2.3 Modellbetrieb C – Energieoptimierter Neubau einer Einzelhandelsgärtnerei (Zierpflanzenbau) ..... 19
2.4 Modellbetrieb D – Neubau auf der Basis ausschließlich geothermischer Beheizung ..... 19
**3 Geologisch/hydrogeologische und geothermische Typisierung der Modellstandorte ..... 20**
3.1 Region X (Raum Dresden) ..... 20
3.1.1 Geologisch/hydrogeologische Verhältnisse ..... 20
3.1.2 Geothermische Verhältnisse ..... 21
3.2 Region Y (Raum Leipzig) ..... 23
3.2.1 Geologisch/hydrogeologische Verhältnisse ..... 23
3.2.2 Geothermische Verhältnisse ..... 24
3.3 Region Z (Raum Chemnitz) ..... 25
3.3.1 Geologisch/hydrogeologische Verhältnisse ..... 25
3.3.2 Geothermische Verhältnisse ..... 25
**4 Wärmequellensysteme und Berechnungsmethoden ..... 26**
4.1 Überblick Wärmequellensysteme ..... 26
4.1.1 Oberflächennahe Erdwärmesonden ..... 26
4.1.2 Mitteltiefe Erdwärmesonden ..... 27
4.1.3 Brunnenanlagen ..... 28
4.2 Projektbezogene Randbedingungen/Spezifizierungen der Wärmequellensysteme ..... 29
4.2.1 Wärmepumpentechnik ..... 29
4.2.2 Oberflächennahe Erdwärmesonden ..... 29
4.2.3 Mitteltiefe Erdwärmesonden ..... 30
4.2.4 Brunnenanlagen ..... 30
4.3 Hydrochemische Betrachtungen und Aufbereitungstechnik ..... 31
4.4 Berechnungsverfahren/eingesetzte Software ..... 33
**5 Modellbetrieb A (Bestehende Einzelhandelsgärtnerei – Zierpflanzenbau) ..... 34**
5.1 Energiebedarfsberechnung ..... 34
5.2 Auslegung der geothermischen Systeme ..... 44
5.2.1 Modellregion X (Raum Dresden) ..... 44
5.2.1.1 Überblick der untersuchten Wärmequellensysteme ..... 44
5.2.1.2 Ergebnisse Variante I – bivalent paralleler Betrieb ..... 44
5.2.1.3 Ergebnisse Variante II – bivalent alternativer Betrieb ..... 51
5.2.2 Modellregion Y (Raum Leipzig) ..... 52
5.2.2.1 Überblick der untersuchten Wärmequellensysteme ..... 52
5.2.2.2 Ergebnisse Variante I – bivalent paralleler Betrieb ..... 53
5.2.2.3 Ergebnisse Variante II – bivalent alternativer Betrieb ..... 58
5.2.3 Modellregion Z (Raum Chemnitz) ..... 60
5.2.3.1 Überblick der untersuchten Wärmequellensysteme ..... 60
5.2.3.2 Ergebnisse Variante I – bivalent paralleler Betrieb ..... 60
5.2.3.3 Ergebnisse Variante II – bivalent alternativer Betrieb ..... 64
5.3 Investitionskosten und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ..... 65
5.3.1 Entwicklung der Energiekosten ..... 65
5.3.2 Investitionskosten ..... 65
5.3.3 Generelle Randbedingungen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen ..... 70
5.3.4 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung Modellbetrieb A ..... 73
5.4 Fördermöglichkeiten ..... 75

5.4.1 Staatliche Förderung ..... 75
5.4.2 Sonstige Förderung ..... 75
5.5 Fazit Modellbetrieb A ..... 76
**6 Modellbetrieb B ..... 77**
6.1 Energiebedarfsberechnung und $CO_2$-Bilanz ..... 77
6.2 Auslegung der geothermischen Systeme ..... 86
6.2.1 Modellregion X (Raum Dresden) ..... 86
6.2.1.1 Überblick der untersuchten Wärmequellensysteme ..... 86
6.2.1.2 Ergebnisse Variante I – bivalent paralleler Betrieb ..... 86
6.2.1.3 Ergebnisse Variante II – bivalent alternativer Betrieb ..... 88
6.2.2 Modellregion Y (Raum Leipzig) ..... 89
6.2.2.1 Überblick der untersuchten Wärmequellensysteme ..... 89
6.2.2.2 Ergebnisse Variante I – bivalent paralleler Betrieb ..... 89
6.2.2.3 Ergebnisse Variante II – bivalent alternativer Betrieb ..... 91
6.2.3 Modellregion Z (Raum Chemnitz) ..... 92
6.2.3.1 Überblick der untersuchten Wärmequellensysteme ..... 92
6.3 Investitionskosten und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ..... 92
6.3.1 Entwicklung der Energiekosten ..... 92
6.3.2 Investitionskosten ..... 92
6.3.3 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung Modellbetrieb B ..... 97
6.4 Fördermöglichkeiten ..... 97
6.4.1 Staatliche Förderung ..... 97
6.4.2 Sonstige Förderung ..... 98
6.5 Fazit Modellbetrieb B ..... 98
**7 Modellbetrieb C ..... 99**
7.1 Betriebsplanung, Energiebedarfsberechnung und $CO_2$-Bilanz ..... 99
7.2 Auslegung der geothermischen Systeme ..... 108
7.2.1 Modellregion X (Raum Dresden) ..... 108
7.2.1.1 Überblick der untersuchten Wärmequellensysteme ..... 108
7.2.1.2 Ergebnisse Variante I – Grundlastabdeckung 30 kW-Wärmepumpe ..... 108
7.2.1.3 Ergebnisse Variante II – Grundlastabdeckung 70 kW-Wärmepumpe ..... 115
7.2.2 Modellregion Y (Raum Leipzig) ..... 116
7.2.2.1 Überblick der untersuchten Wärmequellensysteme ..... 116
7.2.2.2 Ergebnisse Variante I – Grundlastabdeckung 30 kW-Wärmepumpe ..... 117
7.2.2.3 Ergebnisse Variante II – Grundlastabdeckung 70 kW-Wärmepumpe ..... 124
7.2.3 Modellregion Z (Raum Chemnitz) ..... 125
7.2.3.1 Überblick der untersuchten Wärmequellensysteme ..... 125
7.2.3.2 Ergebnisse Variante I – Grundlastabdeckung 30 kW-Wärmepumpe ..... 125
7.2.3.3 Ergebnisse Variante II – Grundlastabdeckung 70 kW-Wärmepumpe ..... 131
7.3 Investitionskosten und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ..... 132
7.3.1 Entwicklung der Energiekosten ..... 132
7.3.2 Investitionskosten ..... 132
7.3.3 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung Modellbetrieb C ..... 139
7.4 Fördermöglichkeiten ..... 140
7.4.1 Staatliche Förderung ..... 140
7.4.2 Sonstige Förderung ..... 141
7.5 Fazit Modellbetrieb C ..... 141
**8 Modellbetrieb D ..... 142**
8.1 Betriebsplanung, Energiebedarfsberechnung und $CO_2$-Bilanz ..... 142
8.2 Auslegung der geothermischen Systeme ..... 150
8.2.1 Modellregion X (Raum Dresden) ..... 150
8.2.1.1 Überblick der untersuchten Wärmequellensysteme ..... 150

8.2.1.2 Ergebnisse Modellbetrieb D, Region X ..... 151
8.2.2 Modellregion Y (Raum Leipzig) ..... 155
8.2.2.1 Überblick der untersuchten Wärmequellensysteme ..... 155
8.2.2.2 Ergebnisse Modellbetrieb D, Region Y ..... 155
8.2.3 Modellregion Z (Raum Chemnitz) ..... 159
8.2.3.1 Überblick der untersuchten Wärmequellensysteme ..... 159
8.2.3.2 Ergebnisse Modellbetrieb D, Region Z ..... 159
8.3 Investitionskosten und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ..... 162
8.3.1 Entwicklung der Energiekosten ..... 162
8.3.2 Investitionskosten ..... 162
8.3.3 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung Modellbetrieb D ..... 166
8.4 Fördermöglichkeiten ..... 167
8.4.1 Staatliche Förderung ..... 167
8.4.2 Sonstige Förderung ..... 167
8.5 Fazit Modellbetrieb D ..... 167
**9 Gesamtbewertung, Zusammenfassung ..... 168**
**10 Literaturverzeichnis ..... 174**

Abbildungsverzeichnis


Abbildung 1: Tiefentemperaturgradienten der Modellregionen ..... 22
Abbildung 2: Schematischer Aufbau einer Erdwärmesonde (Quelle: LfULG 2014) ..... 26
Abbildung 3: Schematischer Aufbau einer Koaxialsonde ..... 27
Abbildung 4: Schematischer Aufbau einer Brunnenanlage (Quelle: verändert nach LfULG 2014) ..... 28
Abbildung 5: Energiebedarf Modellbetrieb A im Jahresverlauf (Stundenwerte) ..... 35
Abbildung 6: Modellbetrieb A – Heizleistung und Lastabdeckung für bivalent alternativen und parallelen Betrieb ..... 36
Abbildung 7: Jahresdauerlinie mit Darstellung der Lastabdeckung (Betrieb A, bivalent parallel) ..... 37
Abbildung 8: Heizungsschema (bivalent parallel) für Integrierung einer Wärmepumpe in bestehendes Heizungssystem – Modellbetrieb A ..... 37
Abbildung 9: Modellbetrieb A – Grundlastanteil und Volllaststunden unterschiedlicher Wärmepumpenleistungen und Pufferspeicher ..... 38
Abbildung 10: $CO_2$-Ausstoß (t/a) unterschiedlicher Energievarianten – Modellbetrieb A ..... 40
Abbildung 11: Jahresdauerlinie mit Darstellung der Lastabdeckung (Betrieb A, bivalent alternativer Betrieb) ..... 41
Abbildung 12: Heizungsschema (bivalent alternativ) für Integrierung einer Wärmepumpe in bestehendes Heizungssystem – Modellbetrieb A ..... 41
Abbildung 13: Modellbetrieb A, Standort X, bivalent paralleler Betrieb – Anordnung der oberflächennahen Erdwärmesonden ..... 44
Abbildung 14: Modellbetrieb A, Standort X, bivalent paralleler Betrieb – Temperaturverhältnisse im GWL nach 25 Jahren (oberflächennahe Erdwärmesonden) ..... 45
Abbildung 15: Modellbetrieb A, Standort X, bivalent paralleler Betrieb – Entwicklung der Fluidtemperaturen in 25 Jahren (oberflächennahe Erdwärmesonden) ..... 46
Abbildung 16: Modellbetrieb A, Standort X, bivalent paralleler Betrieb – Anordnung der mitteltiefen Erdwärmesonden 47
Abbildung 17: Modellbetrieb A, Standort X, bivalent paralleler Betrieb – Temperaturverhältnisse im GWL nach 25 Jahren (mitteltiefe Erdwärmesonden) ..... 48
Abbildung 18: Modellbetrieb A, Standort X, bivalent paralleler Betrieb – Entwicklung der Fluidtemperaturen in 25 Jahren (mitteltiefe Erdwärmesonden) ..... 49
Abbildung 19: Modellbetrieb A, Standort X, bivalent paralleler Betrieb – Anordnung der Brunnen ..... 50
Abbildung 20: Modellbetrieb A, Standort X, bivalent paralleler Betrieb – Temperaturfronten im Bereich der Brunnenanlage ..... 51
Abbildung 21: Modellbetrieb A, Standort Y, bivalent paralleler Betrieb – Anordnung der oberflächennahen Erdwärmesonden ..... 53
Abbildung 22: Modellbetrieb A, Standort Y, bivalent paralleler Betrieb – Temperaturverhältnisse im GWL nach 25 Jahren (oberflächennahe Erdwärmesonden) ..... 54
Abbildung 23: Modellbetrieb A, Standort Y, bivalent paralleler Betrieb – Entwicklung der Fluidtemperaturen in 25 Jahren (oberflächennahe Erdwärmesonden) ..... 54
Abbildung 24: Modellbetrieb A, Standort Y, bivalent paralleler Betrieb – Anordnung der mitteltiefen Erdwärmesonden 55
Abbildung 25: Modellbetrieb A, Standort Y, bivalent paralleler Betrieb – Temperaturverhältnisse im GWL nach 25 Jahren (mitteltiefe Erdwärmesonden) ..... 56
Abbildung 26: Modellbetrieb A, Standort Y, bivalent paralleler Betrieb – Entwicklung der Fluidtemperaturen in 25 Jahren (mitteltiefe Erdwärmesonden) ..... 56
Abbildung 27: Modellbetrieb A, Standort Y, bivalent paralleler Betrieb – Anordnung der Brunnen ..... 57
Abbildung 28: Modellbetrieb A, Standort Y, bivalent paralleler Betrieb – Temperaturfronten im Bereich der Brunnenanlage ..... 58
Abbildung 29: Modellbetrieb A, Standort Z, bivalent paralleler Betrieb – Anordnung der oberflächennahen Erdwärmesonden ..... 61
Abbildung 30: Modellbetrieb A, Standort Z, bivalent paralleler Betrieb – Temperaturverhältnisse im Untergrund nach 25 Jahren (oberflächennahe Erdwärmesonden) ..... 61
Abbildung 31: Modellbetrieb A, Standort Z, bivalent paralleler Betrieb – Entwicklung der Fluidtemperaturen in 25 Jahren (oberflächennahe Erdwärmesonden) ..... 62

Abbildung 32: Modellbetrieb A, Standort Z, bivalent paralleler Betrieb – Anordnung der mitteltiefen Erdwärmesonden 63
Abbildung 33: Modellbetrieb A, Standort Z, bivalent paralleler Betrieb – Temperaturverhältnisse im Untergrund nach 25 Jahren (mitteltiefe Erdwärmesoden) ..... 63
Abbildung 34: Modellbetrieb A, Standort Z, bivalent paralleler Betrieb – Entwicklung der Fluidtemperaturen in 25 Jahren (mitteltiefe Erdwärmesonden) ..... 64
Abbildung 35: Übersicht der Investitionskosten bei den unterschiedlichen geothermischen Nutzungsvarianten – Modellbetrieb A ..... 69
Abbildung 36: Mittelwertfaktoren für Preissteigerungen (Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Jugend, Familie und Gesundheit 1999) ..... 72
Abbildung 37: Stündlich benötigte Heizleistung – Modellbetrieb B ..... 78
Abbildung 38: Modellbetrieb B – Heizleistung und Lastabdeckung für bivalent alternativen und parallelen Betrieb ..... 79
Abbildung 39: Jahresdauerlinie mit Darstellung der Lastabdeckung (Betrieb B, bivalent parallel) ..... 80
Abbildung 40: Heizungsschema (bivalent parallel) für Integrierung einer Wärmepumpe in bestehendes Heizungssystem – Modellbetrieb B ..... 80
Abbildung 41: $CO_2$-Ausstoß (t/a) unterschiedlicher Energievarianten – Modellbetrieb B ..... 82
Abbildung 42: Jahresdauerlinie mit Darstellung der Lastabdeckung (Betrieb B, bivalent alternativer Betrieb) ..... 83
Abbildung 43: Heizungsschema (bivalent alternativ) für Integrierung einer Wärmepumpe in bestehendes Heizungssystem – Modellbetrieb B ..... 84
Abbildung 44: Modellbetrieb B, Region X – offene Grundwassernutzung, Anordnung der Brunnen ..... 87
Abbildung 45: Modellbetrieb B, Region X – offene Grundwassernutzung, hydraulischer Kurzschluss der Brunnenanlage (bivalent paralleler Betrieb) ..... 88
Abbildung 46: Modellbetrieb B, Region X – offene Grundwassernutzung, Temperaturverhältnisse im Grundwasser nach 25 Jahren (bivalent alternativer Betrieb) ..... 89
Abbildung 47: Modellbetrieb B, Region Y – offene Grundwassernutzung, hydraulischer Kurzschluss der Brunnenanlage (bivalent paralleler Betrieb) ..... 90
Abbildung 48: Modellbetrieb B, Region Y – offene Grundwassernutzung, Temperaturverhältnisse im Grundwasser nach 25 Jahren (bivalent alternativer Betrieb) ..... 91
Abbildung 49: Übersicht der Investitionskosten bei den unterschiedlichen geothermischen Nutzungsvarianten – Modellbetrieb B ..... 96
Abbildung 50: Modellbetrieb C – Anlagenplanung ..... 101
Abbildung 51: Stündlich benötigte Heizleistung – Modellbetrieb C ..... 103
Abbildung 52: Modellbetrieb C – Heizleistung und Lastabdeckung für verschiedene Wärmepumpen im bivalent parallelen Betrieb ..... 103
Abbildung 53: Jahresdauerlinie mit Darstellung der Lastabdeckung (Betrieb C, 30 kW-Wärmepumpe) ..... 105
Abbildung 54: Jahresdauerlinie mit Darstellung der Lastabdeckung (Betrieb C, 70 kW-Wärmepumpe) ..... 105
Abbildung 55: Heizungsschema (bivalent parallel) für die Integrierung einer Wärmepumpe in das Heizungssystem – Modellbetrieb C ..... 106
Abbildung 56: $CO_2$-Ausstoß (t/a) unterschiedlicher Energievarianten – Modellbetrieb C ..... 108
Abbildung 57: Modellbetrieb C, Standort X, 30 kW-Wärmepumpe – Anordnung der oberflächennahen Erdwärmesonden ..... 109
Abbildung 58: Modellbetrieb C, Standort X, 30 kW-Wärmepumpe – Temperaturverhältnisse im GWL nach 25 Jahren (oberflächennahe Erdwärmesonden) ..... 110
Abbildung 59: Modellbetrieb C, Standort X, 30 kW-Wärmepumpe – Entwicklung der Fluidtemperaturen in 25 Jahren (oberflächennahe Erdwärmesonden) ..... 111
Abbildung 60: Modellbetrieb C, Standort X, 30 kW-Wärmepumpe – Temperaturverhältnisse im GWL nach 25 Jahren (mitteltiefe Erdwärmesonde) ..... 112
Abbildung 61: Modellbetrieb C, Standort X, 30 kW-Wärmepumpe – Entwicklung der Fluidtemperaturen in 25 Jahren (mitteltiefe Erdwärmesonde) ..... 113
Abbildung 62: Modellbetrieb C, Standort X, 30 kW-Wärmepumpe – Anordnung der Brunnen ..... 114
Abbildung 63: Modellbetrieb C, Standort X, 30 kW-Wärmepumpe – Temperaturfronten im Bereich der Brunnenanlage ..... 115

Abbildung 64: Modellbetrieb C, Standort Y, 30 kW-Wärmepumpe – Anordnung der oberflächennahen Erdwärmesonden ..... 117
Abbildung 65: Modellbetrieb C, Standort Y, 30 kW-Wärmepumpe – Temperaturverhältnisse im Grundwasserleiter (oberflächennahe Erdwärmesonden) ..... 118
Abbildung 66: Modellbetrieb C, Standort Y, 30 kW-Wärmepumpe – Entwicklung der Fluidtemperaturen in 25 Jahren (oberflächennahe Erdwärmesonden) ..... 119
Abbildung 67: Modellbetrieb C, Standort Y, 30 kW-Wärmepumpe – Anordnung der mitteltiefen Erdwärmesonden ..... 120
Abbildung 68: Modellbetrieb C, Standort Y, 30 kW-Wärmepumpe – Temperaturverhältnisse im GWL nach 25 Jahren (mitteltiefe Erdwärmesonden) ..... 121
Abbildung 69: Modellbetrieb C, Standort Y, 30 kW-Wärmepumpe – Entwicklung der Fluidtemperaturen in 25 Jahren (mitteltiefe Erdwärmesonden) ..... 122
Abbildung 70: Modellbetrieb C, Standort Y, 30 kW-Wärmepumpe – Anordnung der Brunnen ..... 123
Abbildung 71: Modellbetrieb C, Standort Y, 30 kW-Wärmepumpe – Temperaturverhältnisse im GWL nach 25 Jahren (Brunnenanlage) ..... 124
Abbildung 72: Modellbetrieb C, Standort Z, 30 kW-Wärmepumpe – Anordnung der oberflächennahen Erdwärmesonden ..... 126
Abbildung 73: Modellbetrieb C, Standort Z, 30 kW-Wärmepumpe – Temperaturverhältnisse im Untergrund nach 25 Jahren (oberflächennahe Erdwärmesonden) ..... 127
Abbildung 74: Modellbetrieb C, Standort Z, 30 kW-Wärmepumpe – Entwicklung der Fluidtemperaturen in 25 Jahren (oberflächennahe Erdwärmesonden) ..... 128
Abbildung 75: Modellbetrieb C, Standort Z, 30 kW-Wärmepumpe – Anordnung der mitteltiefen Erdwärmesonden ..... 129
Abbildung 76: Modellbetrieb C, Standort Z, 30 kW-Wärmepumpe – Temperaturverhältnisse im GWL nach 25 Jahren (mitteltiefe Erdwärmesonden) ..... 130
Abbildung 77: Modellbetrieb C, Standort Z, 30 kW-Wärmepumpe – Entwicklung der Fluidtemperaturen in 25 Jahren (mitteltiefe Erdwärmesonden) ..... 131
Abbildung 78: Modellbetrieb C – Übersicht der gesamten Investitionskosten (netto) für die Nutzung oberflächennaher Erdwärmesonden ..... 138
Abbildung 79: Modellbetrieb C – Übersicht der gesamten Investitionskosten (netto) für die Nutzung mitteltiefer Erdwärmesonden ..... 138
Abbildung 80: Modellbetrieb C – Übersicht der gesamten Investitionskosten (netto) für die Nutzung über Brunnenanlagen ..... 139
Abbildung 81: Planungszeichnung Modellbetrieb D ..... 146
Abbildung 82: Jahresdauerlinie mit Darstellung der Lastabdeckung (Betrieb D, 120 kW-Wärmepumpe) ..... 148
Abbildung 83: Heizungsschema für die Integrierung einer Wärmepumpe in das Heizungssystem – Modellbetrieb D (monovalenter Betrieb) ..... 148
Abbildung 84: $CO_2$-Ausstoß (t/a) unterschiedlicher Energievarianten – Modellbetrieb D ..... 150
Abbildung 85: Modellbetrieb D, Standort X – Anordnung der oberflächennahen Erdwärmesonden ..... 151
Abbildung 86: Modellbetrieb D, Standort X, Temperaturverhältnisse im GWL nach 25 Jahren (oberflächennahe Erdwärmesonden) ..... 152
Abbildung 87: Modellbetrieb D, Standort X – Entwicklung der Fluidtemperaturen in 25 Jahren (oberflächennahe Erdwärmesonden) ..... 153
Abbildung 88: Modellbetrieb D, Standort X – Temperaturverhältnisse im GWL nach 25 Jahren (mitteltiefe Erdwärmesonde) ..... 154
Abbildung 89: Modellbetrieb D, Standort X – Entwicklung der Fluidtemperaturen in 25 Jahren (mitteltiefe Erdwärmesonde) ..... 155
Abbildung 90: Modellbetrieb D, Standort Y – Anordnung der oberflächennahen Erdwärmesonden ..... 156
Abbildung 91: Modell betrieb D, Standort Y – Temperaturverhältnisse im Grundwasserleiter (oberflächennahe Erdwärmesonden) ..... 156
Abbildung 92: Modellbetrieb D, Standort Y – Entwicklung der Fluidtemperaturen in 25 Jahren (oberflächennahe Erdwärmesonden) ..... 157
Abbildung 93: Modellbetrieb D, Standort Y – Temperaturverhältnisse im GWL nach 25 Jahren (mitteltiefe Erdwärmesonden) ..... 158

Abbildung 94: Modellbetrieb D, Standort Y – Entwicklung der Fluidtemperaturen in 25 Jahren (mitteltiefe Erdwärmesonden) ..... 158
Abbildung 95: Modellbetrieb D, Standort Z – Anordnung der oberflächennahen Erdwärmesonden ..... 159
Abbildung 96: Modellbetrieb D, Standort Z – Temperaturverhältnisse im Untergrund (oberflächennahe Erdwärmesonden) ..... 160
Abbildung 97: Modellbetrieb D, Standort Z – Entwicklung der Fluidtemperaturen in 25 Jahren (oberflächennahe Erdwärmesonden) ..... 160
Abbildung 98: Modellbetrieb D, Standort Y – Temperaturverhältnisse im Untergrund nach 25 Jahren (mitteltiefe Erdwärmesonden) ..... 161
Abbildung 99: Modellbetrieb D, Standort Z – Entwicklung der Fluidtemperaturen in 25 Jahren (mitteltiefe Erdwärmesonden) ..... 162
Abbildung 100: Modellbetrieb D – Übersicht der gesamten Investitionskosten (netto) für den Gewächshausneubau ..... 166

Tabellenverzeichnis


Tabelle 1: Überblick der betrachteten Untersuchungsvarianten ..... 16
Tabelle 2: Grunddaten Modellbetrieb B ..... 19
Tabelle 3: Region X – Geologisch/hydrogeologische Charakterisierung ..... 21
Tabelle 4: Region Y – Geologisch/hydrogeologische Charakterisierung ..... 24
Tabelle 5: Region Y – Geologisch/hydrogeologische Charakterisierung ..... 25
Tabelle 6: Grundwasserbeschaffenheit – Modellregionen X und Y ..... 31
Tabelle 7: Modellbetrieb A – Ergebnisse der Heizlastberechnungen mit HORTEX 4.1 ..... 34
Tabelle 8: Untersuchte Wärmeversorgungskonzepte für den Modellbetrieb A beim bivalent parallelen Betrieb ..... 38
Tabelle 9: Kesseldimensionierung für den Modellbetrieb A beim bivalent parallelen Betrieb ..... 39
Tabelle 10: Wärmebedarf und $CO_2$-Emissionen beim bivalent parallelen Betrieb – Modellbetrieb A ..... 39
Tabelle 11: Untersuchte Wärmeversorgungskonzepte für den Modellbetrieb A bei bivalent alternativem Betrieb ..... 42
Tabelle 12: Kesseldimensionierung für den Modellbetrieb A beim bivalent alternativen Betrieb ..... 42
Tabelle 13: Wärmebedarf und $CO_2$-Emissionen beim bivalent alternativen Betrieb – Modellbetrieb A ..... 43
Tabelle 14: Berechnung der Zusatzenergie für Energiebereitstellung und -ausbringung beim bivalent parallelen und bivalent alternativen Betrieb (% vom Gesamtenergiebedarf) ..... 43
Tabelle 15: Modellbetrieb A, Region X – Auslegung der Brunnenanlagen (beide Varianten) ..... 50
Tabelle 16: Modellbetrieb A, Region Y – Auslegung der Brunnenanlagen (beide Varianten) ..... 57
Tabelle 17: Teuerungsraten der Energiepreise und spezifische Energiepreise netto (Stand Juni 2014) ..... 65
Tabelle 18: Kostenschätzung Wärmeverteilnetz und Einbindung Wärmepumpe bei unterschiedlichen Betriebsweisen – Modellbetrieb A ..... 66
Tabelle 19: Kostenschätzung Wärmepumpenanlage inkl. geothermischer Erschließung bei unterschiedlichen Nutzungsvarianten Modellbetrieb A – bivalent parallele Betriebsweise ..... 67
Tabelle 20: Kostenschätzung Wärmepumpenanlage inkl. geothermischer Erschließung bei unterschiedlichen Nutzungsvarianten Modellbetrieb A – bivalent alternative Betriebsweise ..... 67
Tabelle 21: Gesamtinvestitionskosten – Modellbetrieb A ..... 68
Tabelle 22: Ergebnisse der Simulationsberechnungen mit HORTEX 4.1 für den Modellbetrieb B ..... 77
Tabelle 23: Untersuchte Wärmeversorgungskonzepte für den Modellbetrieb B beim bivalent parallelen Betrieb ..... 81
Tabelle 24: Kesseldimensionierung für den Modellbetrieb B beim bivalent parallelen Betrieb ..... 81
Tabelle 25: Wärmebedarf und $CO_2$-Emissionen beim bivalent parallelen Betrieb – Modellbetrieb B ..... 82
Tabelle 26: Untersuchte Wärmeversorgungskonzepte für den Modellbetrieb B bei bivalent alternativem Betrieb ..... 84
Tabelle 27: Kesseldimensionierung für den Modellbetrieb B beim bivalent alternativen Betrieb ..... 85
Tabelle 28: Wärmebedarf und $CO_2$-Emissionen beim bivalent alternativen Betrieb – Modellbetrieb B ..... 85
Tabelle 29: Berechnung der Zusatzenergie für Energiebereitstellung und -ausbringung beim bivalent parallelen und bivalent alternativen Betrieb (% vom Gesamtenergiebedarf) ..... 86
Tabelle 30: Modellbetrieb B, Region X – Auslegung der Brunnenanlagen (beide Varianten) ..... 87
Tabelle 31: Modellbetrieb B, Region Y – Auslegung der Brunnenanlagen (beide Varianten) ..... 90
Tabelle 32: Teuerungsraten der Energiepreise und spezifische Energiepreise netto (Stand Juni 2014) ..... 92
Tabelle 33: Kostenschätzung Wärmeverteilnetz und Einbindung Wärmepumpe bei unterschiedlichen Betriebsweisen – Modellbetrieb B ..... 93
Tabelle 34: Kostenschätzung Wärmepumpenanlage inkl. geothermischer Erschließung bei unterschiedlichen Nutzungsvarianten Modellbetrieb B – bivalent alternative Betriebsweise ..... 94
Tabelle 35: Gesamt Investitionskosten – Modellbetrieb B ..... 95
Tabelle 36: Ergebnisse der Simulationsberechnungen für den Modellbetrieb C ..... 102
Tabelle 37: Untersuchte Wärmeversorgungskonzepte für den Modellbetrieb C ..... 106
Tabelle 38: Kesseldimensionierung für den Modellbetrieb C ..... 107
Tabelle 39: Wärmebedarf und $CO_2$-Emissionen – Modellbetrieb C ..... 107
Tabelle 40: Modellbetrieb C, Region X – Auslegung der Brunnenanlagen (beide Varianten) ..... 114
Tabelle 41: Modellbetrieb C, Region Y – Auslegung der Brunnenanlagen (beide Varianten) ..... 123
Tabelle 42: Kostenschätzung Gewächshausanlage – Modellbetrieb C ..... 133

Tabelle 43: Kostenschätzung Wärmeerzeugungsanlage inkl. Abgasanlagen und hydraulische Einbindung (Kostengruppe 420) Modellbetrieb C ..... 135
Tabelle 44: Kostenschätzung Wärmepumpenanlage inkl. geothermischer Erschließung für die Standorte Dresden, Leipzig und Chemnitz bei unterschiedlichen Nutzungsvarianten – Modellbetrieb C ..... 135
Tabelle 45: Investitionskosten Gewächshausneubau und geothermische Erschließung (gesamt) – oberflächennahe Erdwärmesonden – Modellbetrieb C ..... 136
Tabelle 46: Investitionskosten Gewächshausneubau und geothermische Erschließung (gesamt) – mitteltiefe Erdwärmesonden – Modellbetrieb C ..... 136
Tabelle 47: Investitionskosten Gewächshausneubau und geothermische Erschließung (gesamt) – Brunnenanlagen – Modellbetrieb C ..... 137
Tabelle 48: Grunddaten für die Wärmebedarfsermittlung – Modellbetrieb D ..... 145
Tabelle 49: Temperaturprogramm Modellbetrieb D ..... 147
Tabelle 50: Ergebnisse der Simulationsberechnungen mit HORTEX 4.1 für den Modellbetrieb D ..... 147
Tabelle 51: Untersuchte Wärmeversorgungskonzepte für den Modellbetrieb D ..... 149
Tabelle 52: Kesseldimensionierung für den Modellbetrieb D ..... 149
Tabelle 53: Wärmebedarf und $CO_2$-Emissionen – Modellbetrieb D ..... 149
Tabelle 54: Kostenschätzung Gewächshausanlage – Modellbetrieb D ..... 163
Tabelle 55: Kostenschätzung Wärmeerzeugungsanlage inkl. Abgasanlagen und hydraulische Einbindung (Kostengruppe 420) Modellbetrieb D ..... 164
Tabelle 56: Kostenschätzung Wärmepumpenanlage inkl. geothermischer Erschließung für die Standorte Dresden, Leipzig und Chemnitz bei unterschiedlichen Nutzungsvarianten Modellbetrieb D ..... 165
Tabelle 57: Investitionskosten Gewächshausneubau und geothermische Erschließung (gesamt) – oberflächennahe Erdwärmesonden – Modellbetrieb D ..... 165
Tabelle 58: Investitionskosten Gewächshausneubau und geothermische Erschließung (gesamt) – mitteltiefe Erdwärmesonden – Modellbetrieb D ..... 165

Anlagenverzeichnis (siehe Anlagenband)


1 Charakteristik der Modellbetriebe A bis C
1.1 Modellbetrieb A – Anlagendokumentation
1.2 Modellbetrieb B – Anlagendokumentation
1.3 Modellbetrieb C – Planung Gewächshausanlage und Anlagendokumentation
2 Charakteristik der Modellregionen
2.1 Modellregion X (Raum Dresden)
2.2 Modellregion Y (Raum Leipzig)
2.3 Modellregion Z (Raum Chemnitz)
3 Ergebnisse Energiebedarfsberechnung (stündlicher Wärmebedarf in kW)
3.1 Modellbetrieb A
3.2 Modellbetrieb B
3.3 Modellbetrieb C
3.4 Modellbetrieb D
4 Grafische Ergebnisdokumentation
4.1 Modellbetrieb A
4.1.1 Modellregion X – Bivalent alternativer Betrieb
4.1.2 Modellregion Y – Bivalent alternativer Betrieb
4.1.3 Modellregion Z – Bivalent alternativer Betrieb
4.2 Modellbetrieb B (Modellregion X und Y, bivalent alternativer Betrieb)
4.3 Modellbetrieb C
4.3.1 Modellregion X (Bivalent paralleler Betrieb)
4.3.2 Modellregion Y (Bivalent paralleler Betrieb)
4.3.3 Modellregion Z (Bivalent paralleler Betrieb)
5 Investitionskosten und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung
5.1 Modellbetrieb A
5.1.1 Zusammenfassung der technischen Ausführung und Herstellungskosten der Wärmequellenanlage
5.1.2 Zusammenfassende Wirtschaftlichkeitsbetrachtung
5.2 Modellbetrieb B
5.2.1 Zusammenfassung der technischen Ausführung und Herstellungskosten der Wärmequellenanlage
5.2.2 Zusammenfassende Wirtschaftlichkeitsbetrachtung
5.3 Modellbetrieb C
5.3.1 Zusammenfassung der technischen Ausführung und Herstellungskosten der Wärmequellenanlage
5.3.2 Zusammenfassende Wirtschaftlichkeitsbetrachtung
5.4 Modellbetrieb D
5.4.1 Zusammenfassung der technischen Ausführung und Herstellungskosten der Wärmequellenanlage
5.4.2 Zusammenfassende Wirtschaftlichkeitsbetrachtung
6 Modelldokumentationen
6.1 FEFLOW
6.1.1 Vorbemerkungen
6.1.2 Eingangsdaten für die Modellierung(en)
6.1.3 Modellierung
6.2 HORTEX
6.2.1 Modellbetrieb A
6.2.2 Modellbetrieb B

6.2.3 Modellbetrieb C
6.2.4 Modellbetrieb D
6.3 PHREEQ C
6.3.1 Modellregion X
6.3.2 Modellregion Y

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|---|---|
| DA | Außendurchmesser |
| Eh | Redoxpotenzial |
| el. LF | elektrische Leitfähigkeit |
| ETFE | (Ethylen-Tetrafluorethylen-Copolymer) |
| ges. | gesamt |
| GOK | Geländeoberkante |
| GWL | Grundwasserleiter |
| JAZ | Jahresarbeitszahl |
| HOAI | Honorarordnung für Architekten und Ingenieure |
| PE | Polyethylen |
| PVC | Polyvinylchlorid |
| SI | Sättigungsindex |

# 1 Projektskizze

Die zugespitzte Preissituation im Energiesektor, speziell bei den fossilen Brennstoffen, bedroht die Existenz kleiner und mittlerer Gartenbaubetriebe in Sachsen (RUHM et al. 2007). Nach aktuellen Berechnungen des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) würde eine Erhöhung der Aufwendungen für Heizmaterial um z. B. 50 %, bei sonst unveränderten Bedingungen, in den Topfpflanzenbetrieben einen Gewinnrückgang von rund 28 % und in den Gemüsebaubetrieben von rund 14 % verursachen (BMEL 2013).

Eine Möglichkeit zur Senkung der Energiekosten ist die Nutzung alternativer Energieträger. Hierbei wird das Potenzial erneuerbarer Energie im Bereich der Geothermie, vergleichbar mit der Sonnenenergie, als sehr hoch eingeschätzt. Verschiedene Forschungsprojekte und Pilotanlagen, z. B. an der Lehr- und Versuchsanstalt Heidelberg, der Fachhochschule Erfurt oder in niederländischen Produktionsbetrieben zeigen, dass das Interesse an einer ständig und unabhängig von Wetter und Klima zur Verfügung stehenden Energie in den letzten Jahren deutlich zugenommen hat.

Untersuchungen im Betrieb Baumgärtner am Standort Neustadt-Glewe (Mecklenburg-Vorpommern) zeigten, dass hochwertige und wärmebedürftige Zierpflanzen $CO_2$-neutral ganzjährlich produziert werden können (MEYER et al. 2011). Jedoch ist zu berücksichtigen, dass für eine wirtschaftliche Nutzung von Erdwärme, unabhängig von der geothermischen Nutzungsvariante, bestimmte technische Voraussetzungen einer bestehenden bzw. neu zu planenden Gewächshausanlage gegeben sein müssen.

Eine optimale, wirtschaftliche und nachhaltige Kombination dieser „gewächshausspezifischen“ Faktoren mit den geothermischen Entzugssystemen

- klassisches (oberflächennahes) Erdwärmesondensystem,
- offene Grundwassernutzung und
- mitteltiefe Erdwärmesonden

ist das Ziel des erfolgten Forschungsvorhabens.

Wie eingangs erwähnt, wurden bereits diverse Projekte unter Einsatz erneuerbarer Energien in Gewächshäusern bundesweit realisiert, es handelt sich hierbei jedoch hauptsächlich um konkrete Gewächshäuser, die auf eine geothermische Versorgung umgerüstet oder zu Forschungszwecken komplett neu errichtet wurden.

Für die Einschätzung der Möglichkeiten einer breiten Anwendung geothermischer Systeme insbesondere in sächsischen Gärtnereien besteht Forschungsbedarf vor allem in Bezug auf eine systemische Gesamtbewertung der geothermischen Nutzungsvarianten einerseits und der Betriebsweise der Gewächshäuser andererseits in Abhängigkeit verschiedener regionalgeologischer Standortgegebenheiten.

Vor diesem Hintergrund sind die Einsatzmöglichkeiten der drei oben genannten geothermischen Entzugssysteme (nachfolgend auch Wärmequellensysteme genannt) für vier verschiedene Gartenbaubetriebe untersucht worden:

- Modellbetrieb A: Historisch gewachsene Einzelhandelsgärtnerei (Zierpflanzenbau)
- Modellbetrieb B: Spezialisierter Gemüsebaubetrieb (Tomaten/Gurken)

- Modellbetrieb C: Energieoptimierter Neubau einer Einzelhandelsgärtnerei (Zierpflanzenbau)
- Modellbetrieb D: Entwicklung einer bestmöglichen Betriebsstruktur und eines Nutzungskonzeptes (Zierpflanzen und/oder Gemüsebau) für die optimale Geothermienutzung auf einer vorgegebenen Betriebsfläche

Bei den Betrieben A und B handelt es sich somit um Bestandsbauten, die Betriebe C und D sind Neubauten. Für alle vier Modellbetriebe waren die Wärmequellensysteme unter Beachtung des zu ermittelnden Energiebedarfs für je zwei verschiedene Varianten der Grund- und Spitzenlastverteilung (konventionelles Heizsystem/Geothermie) zu berechnen. Für den Modellbetrieb D bestand die Aufgabe darin, eine ausschließlich geothermische Beheizung zu konzipieren ohne eine konventionelle Spitzenlastabdeckung.

Um den regional variierenden Standortverhältnissen in Sachsen Rechnung zu tragen, ist jeder Modellbetrieb separat an drei verschiedenen Regionaltypen untersucht worden:

- Region X: Raum Dresden/Meißen – Lockergesteins-/Festgesteinstyp mit Grundwasserströmung
- Region Y: Raum Leipzig – Lockergesteinstyp mit Grundwasserströmung
- Region Z: Raum Chemnitz – Festgesteinstyp

Aufgrund der Vielzahl der Untersuchungsvarianten erfolgt in Tabelle 1 ein zusammenfassender Überblick. Hierbei ist jedoch zu betonen, dass bezogen auf die Modellstandorte und Modellbetriebe die jeweilige Nutzbarkeit der geothermischen Entzugssysteme im Vorfeld zu prüfen war.

**Tabelle 1: Überblick der betrachteten Untersuchungsvarianten**

| | | Modellbetrieb A | Modellbetrieb B | Modellbetrieb C | Modellbetrieb D |
|---|---|---|---|---|---|
| **Region X** | Grund-/Spitzlastverteilung Typ 1 | Oberflächennahe Erdwärmesonden<br>Mitteltiefe Erdwärmesonden<br>Offene Grundwassernutzung | | | |
| | Grund-/Spitzlastverteilung Typ 2 | | | | |
| **Region Y** | Grund-/Spitzlastverteilung Typ 1 | | | | |
| | Grund-/Spitzlastverteilung Typ 2 | | | | |
| **Region Z** | Grund-/Spitzlastverteilung Typ 1 | | | | |
| | Grund-/Spitzlastverteilung Typ 2 | | | | |

Allen Dimensionierungsrechnungen der Wärmequellensysteme vorangestellt ist eine detaillierte, stundengenaue Energiebedarfsberechnung der Modellbetriebe. Für die Modellbetriebe C und D erfolgt vorab die ausführliche Planung der Gewächshäuser. Nach der Berechnung/Dimensionierung der Wärmequellensysteme schließen die Untersuchungen in einer detaillierten Wirtschaftlichkeitsbetrachtung unter Einbeziehung der üblichen konventionellen Energieträger.

Dieser Bericht stellt somit eine Beratungshilfe für sächsische Gartenbaubetriebe dar, die es ermöglicht, regional spezifisch und nutzungsorientiert die Einsatzmöglichkeiten geothermischer Energie aus technischer, wirtschaftlicher und ökologischer Sicht grundsätzlich zu überprüfen. Sie ersetzt jedoch in keinem Fall eine detaillierte Planung der jeweiligen Einzelanlage.

# 2 Charakteristik der Betriebsstrukturen

## 2.1 Modellbetrieb A – historisch gewachsene Einzelhandelsgärtnerei (Zierpflanzenbau)

Der Modellbetrieb A entspricht einer historisch gewachsenen Einzelhandelsgärtnerei im Zierpflanzenbau. Es handelt sich (wie bei allen Modellbetrieben) um einen fiktiven Beispielbetrieb, wobei die Situation der vieler sächsischer Gartenbaubetriebe entspricht.

Der Betrieb baut auf Altsubstanz auf, hat in den letzten Jahren aber schon einige grundlegende Modernisierungen durchgeführt. Der vorherrschende Absatzweg ist die Direktvermarktung im Betrieb.

Kernstück der Einzelhandelsgärtnerei ist ein 400 m² großes Verkaufsgewächshaus. Dies wurde in Anbindung an ein existierendes Wohn- und Geschäftshaus errichtet. In diesem sind neben zwei Wohnbereichen das alte Ladengeschäft mit Kühlzelle und die Heizanlage untergebracht. Ein Teil der alten, historisch gewachsenen Gewächshäuser wurde abgerissen und durch einen Venloblock sowie ein Doppelfoliegewächshaus ersetzt. Die Sortimente wurden umgestellt, sodass keine ausgesprochenen Warmhauskulturen im Betrieb selbst produziert werden. Produktionsschwerpunkte sind in der Winternutzung die Kultur von Frühjahrsblühern, gefolgt von Beet- und Balkonpflanzen. Im Herbst werden neben Cyclamen in der Altsubstanz und im Doppelfoliegewächshaus auch Weihnachtssterne im energetisch günstigeren Venloblock produziert.

Die Lage der Gewächshäuser zueinander und die teilweise unmittelbare Nachbarbebauung sind im Anlagenband (1.1) dargestellt. Der Jahresverlauf der Sollwerte für die einzelnen Gewächshäuser und ihre grundlegenden baulichen Eigenschaften werden ebenfalls dort wiedergegeben. Die bestehenden Heizsysteme erfordern für das Erreichen der benötigten Heizleistung zumindest zeitweise Vorlauftemperaturen von bis zu 80 °C. Die Temperaturansprüche bzw. der Wärmebedarf für das Wohn- und Geschäftshaus sind hier nicht berücksichtigt.

Für die Dimensionierung der einzelnen Wärmequellensysteme sind neben den energetischen Anforderungen auch die verfügbaren Platzverhältnisse ausschlaggebend. Grundsätzlich wird davon ausgegangen, dass die Flächen im Umkreis von 20 m um die vorhandene Bebauung dafür zur Verfügung stehen.

## 2.2 Modellbetrieb B – Spezialisierter Gemüsebaubetrieb (Tomaten/Gurken)

Der Modellbetrieb B ist ein mittelgroßer Betrieb, der auf die Produktion von Gurken und Tomaten auf Substrat spezialisiert ist. Es handelt sich wie beim Modellbetrieb A um einen fiktiven Beispielbetrieb.

Generell wird angestrebt, in einem möglichst hohen Zeitanteil des Jahres mit Ware am Markt zu sein. Auf Grund des Lichtmangels ist im Winter eine Belegungspause unvermeidbar. Der Gewächshausblock wurde in den letzten Jahren errichtet und entspricht in etwa dem Stand der Technik. Die Jungpflanzen werden nicht im eigenen Betrieb erzeugt, sondern zum Pflanztermin von einem Spezialbetrieb zugekauft.

Die bestehenden Heizsysteme erfordern für das Erreichen der benötigten Heizleistung zumindest zeitweise eine Vorlauftemperatur von bis zu 80 °C.

Bei der Gewächshausanlage handelt es sich um ein Produktionsgewächshaus mit einer Kappenbreite von 3,20 m, einer Schiffbreite von 9,60 m und einer Traufhöhe von 5,00 m. Der Grundriss des Betriebes ist im Anlagenband (1.2) dargestellt. Der Jahresverlauf der Sollwerte für die einzelnen Abteilungen und ihre grundlegenden baulichen Eigenschaften sind ebenfalls im Anlagenband (1.2) wiedergegeben.

Die fiktive Gewächshausanlage in Venlo-Bauweise setzt sich aus zwei Produktionsabteilen (je 9.984 m²) und einem Arbeitsverbinder (998,4 m²) zusammen und weist eine Bruttogrundfläche von 20.966,4 m² auf. Zur Senkung des Wärmebedarfs wurden zwei Energieschirmanlagen (Tages- und Energieschirm) mit umlaufender Schürze im Rand- und Binderbereich, welche am Ober- und Untergurt der Gitterbinder befestigt sind, installiert. Des Weiteren wurde für die Steh- und Giebelwandflächen Isolierverglasung und für den Dachbereich Einfachverglasung als Eindeckmaterial gewählt. Beide Produktionsabteile weisen je einen Arbeitsweg von 4 m Breite und 96 m Länge auf und sind über den Arbeitsverbinder erreichbar, sodass die innerbetrieblichen Produktionsabläufe zügig abzuwickeln sind.

Im Arbeitsverbinder der Gewächshausanlage sind die Büro- und Sozialräume und die für die Produktionsabläufe notwendigen technischen Anlagen (Wärmeerzeugungsanlagen, Bewässerungsanlagen, Düngemischunits, Tagesvorratsbehälter, Schaltschränke, Sortiermaschinen, Kühlräume u. a.) untergebracht. Der Arbeitsverbinder wurde aus Gründen zur Vermeidung von Wärmeeintrag mit Isopaneele und die Trenngiebel und Trennwände mit Einfachverglasung eingedeckt. Für den ein- bzw. zweitriebigen Tomatenanbau, z. B. mit dem V-System, und für den Gurkenanbau wurde an den Montagehilfsprofilen (Gewächshausgiebeln) sowie an den Gitterbindern (abgehängt) ein Kulturspalier befestigt. Die Wärmeerzeugung erfolgt über eine Mehrkesselanlage (Energieträger: fossile Energieträger) und die Wärme wird hauptsächlich über eine Fußrohrheizung, welche zusätzlich als Fahrschiene für die Pflege- und Erntearbeiten genutzt werden kann, in der Gewächshausanlage verteilt. Zusätzlich wurden für den Abtaufall und zur Abschirmung der Kulturen im Stehwand- und Dachbereich Heizungsrohre installiert. Die Pflanzenbewässerung bzw. -düngung (geschlossenes System) erfolgt über Einzeltropfer, die direkt in das Substrat gesteckt werden.

Weil als Wärmequelle die oberflächennahe Geothermie (Erdwärmesonden, Erdwärmekollektoren, Brunnenanlagen) genutzt werden soll, wird für den gegenwärtigen Modellbetrieb B eine Wärmepumpe mit einer thermischen Leistung von 700 kW installiert. Zur Optimierung der Wärmepumpenlaufzeiten und zur Speicherung von Niedertemperaturwärme wird ein 30 m³ Schichtenspeicher in unmittelbarer Nähe zur Wärmeerzeugungsanlage realisiert. Dieser Pufferspeicher wird auf einer Bodenplatte fixiert. Als Heizregister sollen im gesamten Produktionsbereich Aluminium-Flügelrohre eingesetzt werden, die durch ihre hohe Wärmeabgabe für die Ausbringung von Niedertemperaturwärme prädestiniert sind. Die installierten Aluminium-Flügelrohre werden für die Kulturen zwischen den Reihen vertikal übereinander angeordnet und sind in der Höhe verstellbar.

Für die Wärmebedarfsermittlung (siehe Kapitel 6.1) mit Hilfe des Wärmebedarfssimulationsprogramms HORTEX 4.1 wurden die Daten entsprechend Tabelle 2 zugrunde gelegt.

**Tabelle 2: Grunddaten Modellbetrieb B**

| - | Abteilung 1 | Abteilung 2 | Arbeitsverbinder |
|---|---|---|---|
| **Grundfläche (m²)** | 10.000 | 10.000 | 1.050 |
| **Stehwandlänge (m)** | 104 | 104 | 104 |
| **Giebelbreite (m)** | 96 | 96 | 9,60 |
| **Kappenbreite** | 3,20 | 3,20 | 3,20 |
| **Traufhöhe (m)** | 5 | 5 | 5 |
| **Dachwinkel (°)** | 21,50 | 21,50 | 21,50 |
| **Eindeckung Außenstehwand** | Isolierglas | Isolierglas | Isolierglas |
| **Eindeckung Außengiebel** | Isolierglas | Isolierglas | Isolierglas |
| **Eindeckung Dach** | Einfachglas | Einfachglas | Einfachglas |
| **Energieschirm** | Mehrlagig, gering aluminisiert, gut dichtend | Mehrlagig, gering aluminisiert, gut dichtend | Mehrlagig, gering aluminisiert, gut dichtend |
| **Auslegungs-temperatur (°C)** | 22 | 20 | 15 |
| **Temperatur im Abtaufall (°C)** | 12 | 12 | 12 |

Wie auch beim Modellbetrieb A wird grundsätzlich davon ausgegangen, dass die Flächen im Umkreis von 20 m um die vorhandene Bebauung für die Errichtung der geothermischen Wärmequellensysteme zur Verfügung stehen.

## 2.3 Modellbetrieb C – Energieoptimierter Neubau einer Einzelhandelsgärtnerei (Zierpflanzenbau)

Bei Modellbetrieb C handelt es sich in Anlehnung an den Modellbetrieb A ebenso um einen Zierpflanzenbetrieb mit der nahezu gleichen Produktionsgrundfläche. Neben dem Nutzungskonzept sind auch die Flächengrößen identisch zum Modellbetrieb A. Unter Berücksichtigung des angebauten Sortimentes von Modellbetrieb A (vorgegebene Heizungssollwerte) ist ein neuer energieoptimierter Zierpflanzenbetrieb zu entwerfen. Die genaue Betriebsplanung einschließlich der Energiebedarfsberechnung enthält das Kapitel 7.1.

## 2.4 Modellbetrieb D – Neubau auf der Basis ausschließlich geothermischer Beheizung

Modellbetrieb D ist der fiktivste der vier Nutzungstypen. Es handelt sich um einen kompletten Neubau, der im Wesentlichen darauf ausgerichtet ist, *im ersten Schritt* das optimale geothermische System standortspezifisch zu ermitteln. Die Betriebsflächen entsprechen in etwa denen der Modellbetriebe A und C.

Die genaue Betriebsplanung einschließlich der Energiebedarfsberechnung enthält das Kapitel 8.1.
Im Ergebnis der optimalen geothermischen Nutzungsvariante soll eine innovative, bestmögliche Betriebsstruktur und Nutzungskonzeption entwickelt werden. Es sind vorab somit weder bestimmte Kulturen (bzw. entsprechende Heizungssollwerte) definiert, noch bestimmte bauliche Anforderungen/Randbedingungen.

# 3 Geologisch/hydrogeologische und geothermische Typisierung der Modellstandorte

## 3.1 Region X (Raum Dresden)

### 3.1.1 Geologisch/hydrogeologische Verhältnisse

Wie bereits in Kapitel 1 erwähnt, werden die oben genannten Modellbetriebe jeweils an drei verschiedenen Standorten untersucht.

Die Region X stellt dabei den Großraum Dresden dar. Charakteristisch dafür ist eine, von der Geländeoberfläche bis in etwa 20 m Tiefe reichende Lockergesteinsbedeckung. Sie ist im Wesentlichen rollig ausgebildet (Sand und Kies). Unter dem Lockergestein folgen Festgesteine. Diese bestehen in der Modellregion X im hangenden Bereich aus Mergelsteinen (dem sogenannten Pläner) und im Liegenden aus Sandsteinen. Es handelt sich bei beiden Folgen um kreidezeitliche Sedimentgesteine in einer Gesamtmächtigkeit von 130 m (30 m Pläner und 100 m Sandstein). Als tiefste Schichtfolge wird ab einer Tiefe von 150 m unter Gelände der Granodiorit berücksichtigt. Aufgrund ihrer hohen Mächtigkeit stellt diese Schichtfolge das tiefste und zugleich älteste (relevante) Element der Modellregion X dar.

Der beschriebene Aufbau ist grafisch im Anlagenband (2.1) zusammengefasst.

Grundsätzlich ist darauf hinzuweisen, dass es sich um generalisierte Musterprofile handelt, die die durchschnittlichen, regional typischen Verhältnisse widerspiegeln. An realen Standorten sind Abweichungen, vor allem der Schichtmächtigkeiten, aber auch in Form zusätzlich vorhandener Schichtfolgen zu erwarten.

Der Grundwasserflurabstand ist im gesamten Modellbetrieb mit 3 m berücksichtigt. Es herrschen somit ungespannte Druckverhältnisse. Hinsichtlich der geohydraulischen Parameter sind regional charakteristische Durchschnittswerte bzw. pauschalierte Annahmen hinsichtlich der Grundwasserfließrichtung angesetzt worden.

- generelle Grundwasserfließrichtung: von Süd nach Nord
- Grundwassergefälle: 1 Promille

Die Betriebsflächen der Modellbetriebe sind in ihrer Längsachse stets parallel zur Grundwasserströmung positioniert. Fremde (nicht geothermisch bezogene) Grundwasserentnahmen werden generell nicht berücksichtigt. Eine standortbezogene Entnahme von Grundwasser zu Bewässerungszwecken findet ebenfalls keine Beachtung. Die durchschnittlichen Bewässerungsmengen im Gemüsebau (geschlossene Systeme) von ca. 1 bis 1,5 $m^3/(m^2\ a)$ wären mengenmäßig ohnehin nicht relevant.

In der Tabelle 3 sind die wichtigsten geologisch/hydrogeologischen Eigenschaften der einzelnen Schichten zusammengefasst. Darüber hinaus sind bereits die im nachfolgenden Kapitel betrachteten geothermischen Eigenschaften mit aufgeführt.

**Tabelle 3: Region X – Geologisch/hydrogeologische Charakterisierung**

| Teufe (m u. GOK) | Gestein | Dichte (kg/m³) | Nutzbare Porosität (-) | Durchlässigkeitsbeiwert ($k_f$) (m/s) | Wärmeleitfähigkeit (W/(m K)) trocken/gesättigt | | Wärmekapazität (MJ/(m³ K)) trocken/gesättigt | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 – 1 | Boden, schluffig | 2.200 | 0,2 | 5,0E-06 | 0,4 | 1,6 | 1,5 | 2,3 |
| 1 – 10 | Sand | 2.100 | 0,15 | 3,0E-04 | 0,5 | 2,4 | 1,6 | 2,2 |
| 10 – 20 | Kies | 2.000 | 0,22 | 1,0E-03 | 0,4 | 1,8 | 1,4 | 2,5 |
| 20 – 50 | Mergelstein | 2.500 | 0,05 | 1,0E-06 | 2,3 | | 2,2 | 2,2 |
| 50 – 150 | Sandstein | 2.400 | 0,1 | 1,0E-04 | 2,8 | 3,5 | 2,0 | 2,4 |
| > 150 | Granodiorit | 3.000 | 0,05 | 1,0E-07 | 2,8 | | 2,6 | 2,6 |

Wie zu erkennen ist, erfolgt die Grundwasserbewegung vorrangig im Lockergestein und dort in erster Linie im kiesigen Bereich zwischen 10 und 20 m Tiefe. Auch die kreidezeitlichen Sandsteine stellen einen guten Grundwasserleiter dar, wogegen die übrigen Gesteinsfolgen als Grundwassergeringleiter einzustufen sind.

An dieser Stelle wird noch einmal darauf hingewiesen, dass auch die aufgeführten Gesteinskennwerte als charakteristische Mittelwerte zu betrachten sind, welche innerhalb der Modellregion räumlich variieren (gilt grundsätzlich für alle Regionen).

### 3.1.2 Geothermische Verhältnisse

Die grundlegenden geothermischen Gesteinseigenschaften sind bereits in der Tabelle 3 aufgeführt worden.

Wie zu erkennen ist, sind vor allem die Sandsteine und der Granodiorit sehr gut bis gut wärmeleitende Gesteine. Neben der reinen Wärmeleitfähigkeit der Gesteine spielt jedoch auch der grundwasserströmungsbedingte, konvektive Wärmetransport eine bedeutende Rolle bei der Dimensionierung der geothermischen Wärmequellensysteme. Aufgrund ihrer Durchlässigkeitsbeiwerte sind hier die wassergesättigten Lockergesteinsbereiche und der Sandstein von Bedeutung.

Besondere Bedeutung kommt neben den reinen gesteinsspezifischen Parametern den Temperaturverhältnissen im Untergrund zu. Die Anwendung eines pauschalen Ansatzes der Temperaturzunahme von 3 K je 100 m Tiefe ist nicht realistisch und würde die Spezifik der einzelnen Regionen nicht widerspiegeln. Auch die eingangs beabsichtigte Nutzung der Tiefentemperaturgradienten eines analytischen Simulationsprogramms für Erdwärmesonden erwies sich als ungeeignet. Hier waren durchweg zu geringe Temperaturgradienten hinterlegt, sodass deutlich zu kühle Untergrundtemperaturen berechnet wurden.

Weil die Dimensionierung der Wärmequellensysteme jedoch in deutlichem Maße von den realen Untergrundtemperaturen beeinflusst wird, ist größter Wert auf die Ermittlung der regional charakteristischen Untergrundtemperaturen gelegt worden.

Hierzu sind für jeden Standorttyp vorhandene, lokale Temperaturprofilmessungen der HGC Hydro-Geo-Consult GmbH zusammengestellt worden. Es handelt sich je Standort um etwa fünf hoch auflösende Temperaturprofilmessungen in Erdwärmesonden (Tiefen bis ca. 130 m), die einen plausiblen und eindeutigen Verlauf des Tiefentemperaturgradienten zeigen. Sie sind im Rahmen von Thermal-Response-Tests ermittelt worden. Über eine Mittelwertbildung und die jeweilige Anpassung einer linearen Ausgleichsfunktion konnten neue, deutlich plausiblere (auf realen Feldmessungen basierende) Temperaturkurven abgleitet werden.

Die in Abbildung 1 für alle drei Standorte dargestellten Verhältnisse werden in allen Modellrechnungen angesetzt.

Die Temperaturen im Teufenbereich von 0 bis 25 m Tiefe entsprechen im Jahresmittel der Untergrundtemperatur in 25 m Tiefe (Werte werden als konstant angesetzt). Damit ergibt sich für die Region X eine geothermische Tiefenstufe von 1,9 K je 100 m. Dies bedeutet z. B. in 200 m Tiefe eine Temperatur von 13,6 °C und in 450 m Tiefe von 18,35 °C. Im Vergleich mit den Angaben aus BERGER et al. (2011) zeigt sich eine gute Übereinstimmung, obgleich die Angaben aufgrund der dort erheblich höheren Tiefenreichweite nicht gänzlich vergleichbar sind.

Wie der Abbildung 1 zu entnehmen ist, ähneln sich die Temperaturverhältnisse der Region X und Y. Für die Region X sind die Gebirgstemperaturen bis in 450 m etwas kühler als für die Region Y, jedoch deutlich wärmer als für die Region Z. Der Tiefentemperaturgradient ist jedoch in der Region X am größten im Vergleich mit den übrigen beiden Standorttypen.

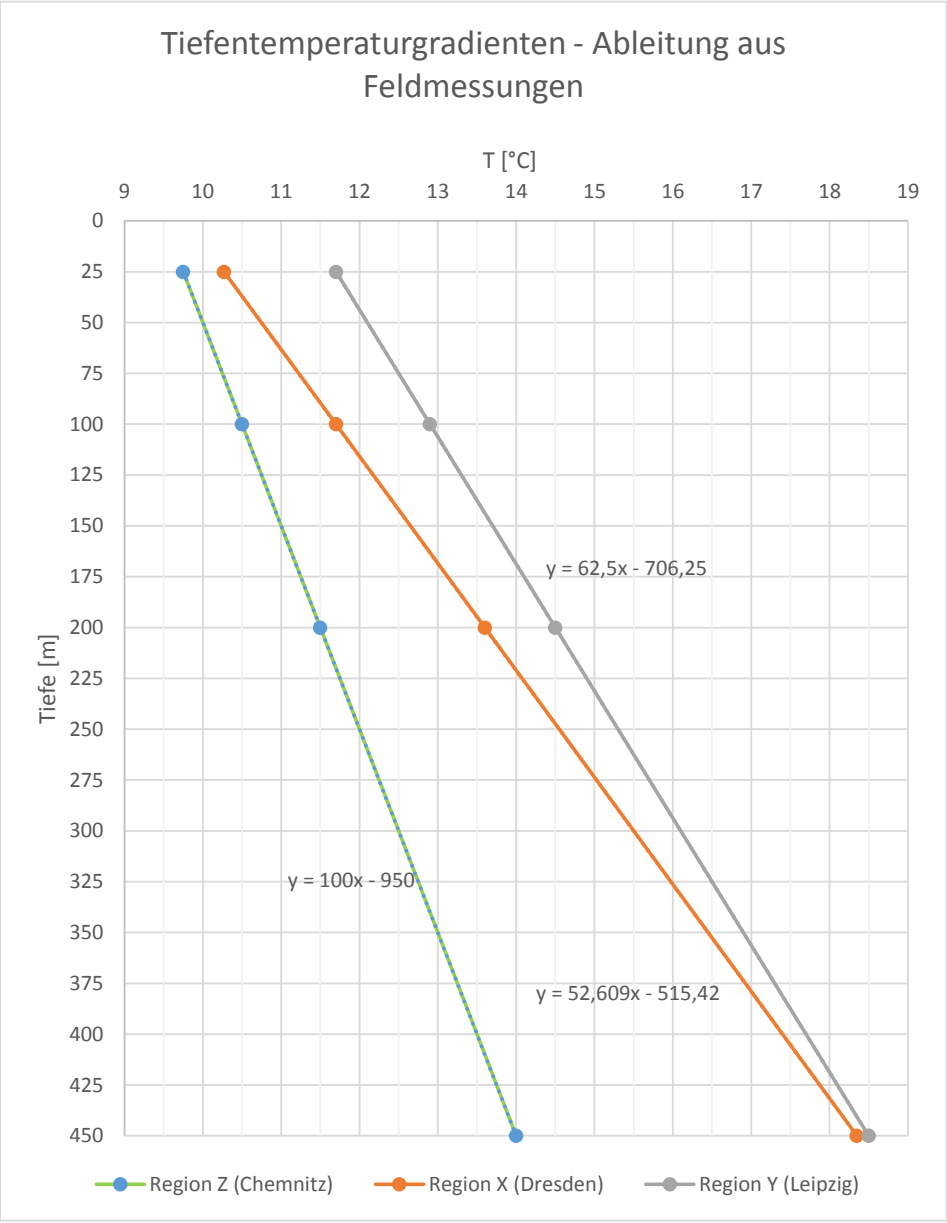



**Abbildung 1: Tiefentemperaturgradienten der Modellregionen**

## 3.2 Region Y (Raum Leipzig)

### 3.2.1 Geologisch/hydrogeologische Verhältnisse

Die Region Y stellt mit dem Großraum Leipzig den zweiten signifikant grundwasserbeeinflussten Standort mit deutlicher Lockergesteinsbedeckung dar.

Die Lockergesteinsbedeckung aus quartären und tertiären Folgen reicht hier jedoch bis in 80 m Tiefe. Im Anlagenband (2.2) ist die Schichtenfolge grafisch dargestellt, die Tabelle 4 zeigt die Gesteinsfolgen einschließlich einiger spezifischer Eigenschaften.

Wie zu erkennen ist, stehen unter den quartären Folgen die Tone, Schluffe und Sande des Tertiär an. Zwei jeweils 5 m mächtige Braunkohlenflöze werden innerhalb der tertiären Sedimente ebenfalls ausgehalten.

Unter dem Lockergestein folgt ab einer Teufe von 80 m Grauwacke. Aufgrund ihrer hohen Mächtigkeit stellt diese Schichtfolge das tiefste und zugleich älteste (relevante) Element der Modellregion Y dar. Wie für die Region X handelt es sich auch hier um ein generalisiertes Musterprofil. Abweichungen der Schichtmächtigkeiten und Eigenschaften sind an realen Einzelstandorten zu erwarten.

Im Teufenbereich von 10 bis 25 m und von 35 bis 45 m sind jeweils Grundwasserleiter ausgebildet, von denen der obere ungespannte, der untere hingegen gespannte Druckverhältnisse aufweist.

Der Grundwasserflurabstand ist im gesamten Modellbetrieb mit 12 m berücksichtigt. Hinsichtlich der geohydraulischen Parameter sind wie auch bei der Region X regional charakteristische Durchschnittswerte bzw. pauschalisierte Annahmen hinsichtlich der Grundwasserfließrichtung angesetzt worden.

- generelle Grundwasserfließrichtung: von Süd nach Nord
- Grundwassergefälle: 1 Promille

Die Betriebsflächen der Modellbetriebe sind in ihrer Längsachse stets parallel zur Grundwasserströmung positioniert. Fremde (nicht geothermisch bezogene) Grundwasserentnahmen werden auch hier nicht berücksichtigt.

In der Tabelle 4 sind die wichtigsten geologisch/hydrogeologischen Eigenschaften der einzelnen Schichten zusammengefasst. Darüber hinaus sind bereits die im nachfolgenden Kapitel betrachteten geothermischen Eigenschaften mit aufgeführt.

Wie zu erkennen ist, erfolgt eine signifikante Grundwasserbewegung allein im Lockergesteinsbereich und dort in den bereits oben beschriebenen beiden GWL. Entgegen der Region X findet im Festgesteinsbereich keine bedeutende Grundwasserbewegung statt.

**Tabelle 4: Region Y – Geologisch/hydrogeologische Charakterisierung**

| Teufe (m u. GOK) | Gestein | Dichte (kg/m³) | Nutzbare Porosität (-) | Durchlässigkeitsbeiwert ($k_f$) (m/s) | Wärmeleitfähigkeit (W/(m K)) trocken/gesättigt | | Wärmekapazität (MJ/(m³ K)) trocken/gesättigt | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 – 1 | Boden, sandig | 2.100 | 0,2 | 2,0E-04 | 0,3 | 1,2 | 1,6 | 2,0 |
| 1 – 6 | Kies | 2.000 | 0,22 | 1,0E-03 | 0,4 | 1,8 | 1,4 | 2,5 |
| 6 – 10 | Geschiebemergel | 2.300 | 0,05 | 1,0E-06 | 0,5 | 2,1 | 1,5 | 2,5 |
| 10 – 17 | Sand | 2.100 | 0,15 | 2,0E-04 | 0,4 | 2,4 | 1,6 | 2,2 |
| 17 – 25 | Kies | 2.000 | 0,22 | 1,0E-03 | 0,4 | 1,8 | 1,4 | 2,5 |
| 25 - 30 | Ton | 2.200 | 0,05 | 1,0E-09 | 0,5 | 1,7 | 1,5 | 2,6 |
| 30 – 35 | Braunkohle | 1.200 | 0,05 | 5,0E-06 | 0,3 | 0,6 | 1,8 | 2,0 |
| 35 – 45 | Sand | 2.100 | 0,15 | 4,0E-04 | 0,4 | 2,4 | 1,6 | 2,2 |
| 45 – 50 | Braunkohle | 1.200 | 0,05 | 5,0E-06 | 0,3 | 0,6 | 1,8 | 2,0 |
| 50 – 80 | Schluff | 2.100 | 0,05 | 5,0E-07 | 0,5 | 1,7 | 1,5 | 2,1 |
| >80 | Grauwacke | 2.500 | 0,05 | 1,0E-08 | 2,6 | | 1,6 | |

### 3.2.2 Geothermische Verhältnisse

Die grundlegenden geothermischen Gesteinseigenschaften sind bereits in Tabelle 4 aufgeführt worden.

Die am besten wärmeleitenden Gesteine stellen die Grauwacken dar, wobei mit Werten um 2,4 W/(m K) auch die wassergesättigten Sande gute Wärmeleitfähigkeiten besitzen. Eine sehr schlechte Wärmeleitfähigkeit weisen die ungesättigte Bodenzone (0–12 m u. GOK) und die Braunkohlenflöze auf.

Wie bereits bei Region X erwähnt, spielt neben der reinen Wärmeleitfähigkeit der Gesteine auch der grundwasserströmungsbedingte, konvektive Wärmetransport eine bedeutende Rolle bei der Dimensionierung der geothermischen Wärmequellensysteme. Aufgrund ihrer Durchlässigkeitsbeiwerte sind hier jedoch allein die beiden, im vorangestellten Kapitel erwähnten Grundwasserleiter im Teufenbereich von 12 bis 25 m und von 35 bis 45 m von Bedeutung.

Der Teufenverlauf der Untergrundtemperaturen ist in der Abbildung 1 bereits dargestellt worden. Daraus ergibt sich für die Region Y eine geothermische Tiefenstufe von 1,6 K je 100 m. Dies bedeutet z. B. in 200 m Tiefe eine Temperatur von 14,6 °C und in 450 m Tiefe von 18,5 °C. In 200 m Tiefe herrschen somit etwa 1 K höhere Temperaturen als in der Region X. In 450 m Tiefe sind die Temperaturen hingegen fast gleich. Die teufenabhängige Temperaturzunahme ist etwas geringer als in der Region X, jedoch immer noch deutlich höher als für die Region Z.

Die generelle Ermittlung der Untergrundtemperaturen für die Modellregionen ist bereits in Kapitel 3.1.2 dargestellt worden.

## 3.3 Region Z (Raum Chemnitz)

### 3.3.1 Geologisch/hydrogeologische Verhältnisse

Die Region Z repräsentiert die Region Chemnitz. Es handelt sich im Gegensatz zu den beiden vorherigen Regionen um einen ausdrücklichen Festgesteinsbereich ohne als Grundwasserleiter fungierende Schichten. Im Anlagenband (2.3) ist die Schichtenfolge grafisch dargestellt, die Tabelle 5 zeigt die Gesteinsfolgen einschließlich einiger spezifischer Eigenschaften.

Wie zu erkennen ist, existieren in der Region Z keine Grundwasserleiter. Vielmehr erfolgt die Grundwasserbewegung im Bereich von Kluft- und Störungszonen. Selbst die Zersatzzone des Phyllit ist deutlich tonig/schluffig ausgebildet und stellt daher keinen Grundwasserleiter dar.

**Tabelle 5: Region Y – Geologisch/hydrogeologische Charakterisierung**

| Teufe (m u. GOK) | Gestein | Dichte (kg/m³) | Nutzbare Porosität (-) | Durchlässigkeitsbeiwert ($k_f$) (m/s) | Wärmeleitfähigkeit (W/(m K)) trocken/gesättigt | | Wärmekapazität (MJ/(m³ K)) trocken/gesättigt | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 – 0,5 | Boden, lehmig | 2.200 | 0,2 | 1,0E-05 | 0,3 | 1,2 | 1,5 | 2,3 |
| 0,5 - 7 | Lehm | 2.100 | 0,08 | 1,0E-06 | 0,5 | 1,7 | 1,5 | 2,1 |
| 7 – 10 | Hangschutt (lehmig, sandig, schluffig) | 2.000 | 0,1 | 1,0E-06 | 1,7 | 2,1 | 2,1 | 2,4 |
| 10 – 25 | Zersetzter Phyllit | 2.600 | 0,11 | 1,0E-07 | 2,3 | | 2,2 | |
| >25 | Phyllit | 2.800 | 0,05 | 1,0E-08 | 2,9 | | 2,4 | |

Bis in eine Tiefe von 10 m (bis einschließlich Hangschutt) wird von ungesättigtem Porenraum ausgegangen, für den Zersatzhorizont und das unverwitterte Festgestein werden wassergesättigte Verhältnisse angesetzt. Hinsichtlich der geohydraulischen Parameter sind wie auch bei den vorangestellten Regionen regional charakteristische Durchschnittswerte bzw. pauschalisierte Annahmen hinsichtlich der Grundwasserfließrichtung angesetzt worden.

- generelle Grundwasserfließrichtung: von Süd nach Nord

Die Betriebsflächen der Modellbetriebe sind in ihrer Längsachse stets parallel zur Grundwasserströmung positioniert. Fremde (nicht geothermisch bezogene) Grundwasserentnahmen werden auch hier nicht berücksichtigt.

### 3.3.2 Geothermische Verhältnisse

Die grundlegenden geothermischen Gesteinseigenschaften sind bereits in der Tabelle 5 aufgeführt worden. Grundsätzlich weist der bereits ab 25 m Tiefe anstehende Phyllit eine sehr gute Wärmeleitfähigkeit auf. Im Gegensatz zu den vorangestellten Regionen X und Y spielt der grundwasserströmungsbedingte, konvektive Wärmetransport praktisch keine Rolle. Es findet somit nur Wärmeleitung im Gestein statt.

Der Teufenverlauf der Untergrundtemperaturen ist in der Abbildung 1 bereits mit dargestellt worden. Daraus ergibt sich für die Region Z eine geothermische Tiefenstufe von 1,0 K je 100 m. Dies bedeutet z. B. in 200 m Tiefe eine Temperatur von 11,5 °C und in 450 m Tiefe von 14,0 °C. Die Untergrundtemperaturen sind deutlich geringer als in den Regionen X und Y. In 450 m Tiefe beträgt die Differenz somit mehr als 4 K.

# 4 Wärmequellensysteme und Berechnungsmethoden

## 4.1 Überblick Wärmequellensysteme

### 4.1.1 Oberflächennahe Erdwärmesonden

Oberflächennahe Erdwärmesonden stellen in Sachsen das am häufigsten vertretene geothermische Wärmequellensystem dar. Sie zeichnen sich bei einer sehr langen Lebensdauer durch einen im Wesentlichen wartungsfreien Betrieb aus und beeinträchtigen die Nutzbarkeit des jeweiligen Grundstücks nicht wesentlich. Sie sind praktisch flächendeckend abwendbar. Eine Ausnahme stellen z. B. Schutz- bzw. Restriktionsgebiete, vor allem in Form von Trink- bzw. Heilquellenschutzgebieten dar. In der Regel werden sie in Bohrlöcher bis in Tiefen um ca. 100 bis 150 m eingebaut, wobei aber auch größere Tiefen möglich sind. Anschließend werden die Rohre mit einem Verfüllmaterial (z. B. Bentonit-Zement-Gemisch) von unten nach oben verfüllt, um eine effektive Anbindung an das Gestein zu gewährleisten.

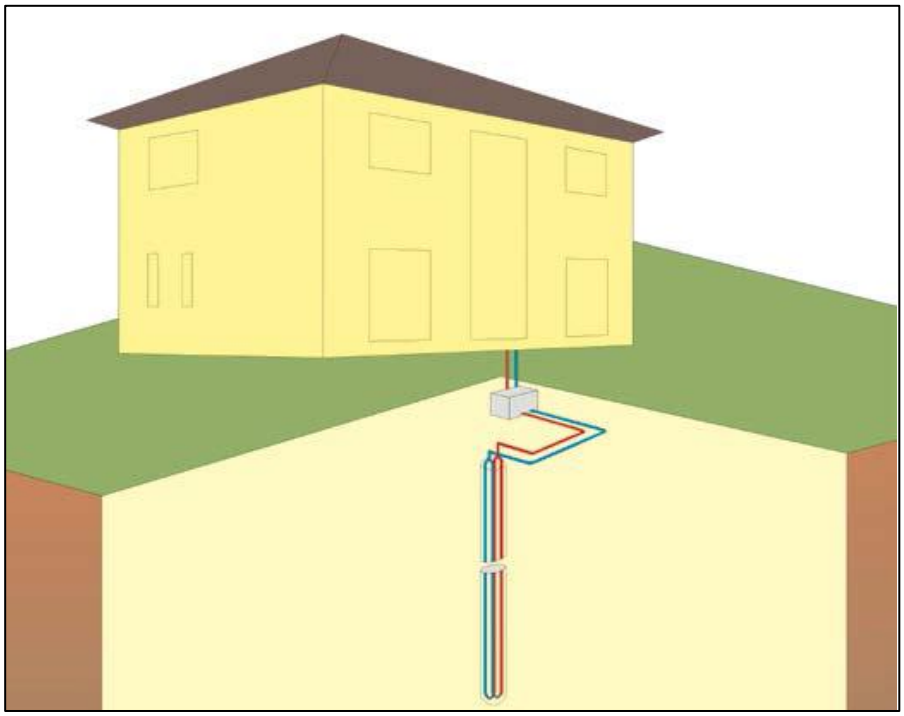


**Abbildung 2: Schematischer Aufbau einer Erdwärmesonde (Quelle: LfULG 2014)**

Hinsichtlich der Einbau- und Materialspezifikation handelt es sich in der Regel um ein vertikal verlegtes U-Rohr bzw. Doppel-U-Rohr aus Polyethylen (PE 100, PE 100-RC oder PE-Xa), das in Verbindung mit einem darin zirkulierenden Wärmeträgerfluid, auch Sole genannt (meist Glykol-Wasser-Gemisch), als unterirdischer Wärmetauscher fungiert. Mehrheitlich kommen Rohre mit Außendurchmessern von 32 oder 40 mm zur Anwendung. Seltener sind Koaxialsonden (Rohr-in-Rohr-System – siehe Kapitel 4.1.2) oder Speichersonden.

Alle Wärmequellensysteme müssen stets unter Beachtung der geologisch/hydrogeologischen und geothermischen Standortverhältnisse, der geforderten Heiz-/Kühlbedarfsprofile sowie der bohrtechnischen bzw. räumlichen Verhältnisse genau und standortspezifisch für einen dauerhaften und nachhaltigen Betrieb dimensioniert werden.

Neben der reinen Nutzung zu Heizzwecken (Erd*wärme*) eignen sich alle Wärmequellensysteme auch sehr gut zur Gebäudekühlung. Bei Erdwärmesonden hat diese „Doppelnutzung“ nicht nur wirtschaftliche Vorteile. Sie führt darüber hinaus auch zu einer zusätzlichen Regenerierung der Erdwärmesonden während der Kühlperioden, weil dem Untergrund nicht allein die Wärmeenergie aus dem Gebirge zuströmt, sondern zusätzlich die „extern“ über die Erdwärmesonden zugeführte Wärme.

### 4.1.2 Mitteltiefe Erdwärmesonden

Bei den mitteltiefen Erdwärmesonden handelt es sich, wie auch bei den oberflächennahen Erdwärmesonden, um ein geschlossenes Wärmequellensystem. Das heißt, der Wärmeträger kommt mit dem Untergrund nicht in direkten Kontakt, sondern zirkuliert innerhalb eines geschlossenen Systems.

Der Übergang von der oberflächennahen zur mitteltiefen Geothermie ist fließend. Mehrheitlich wird jedoch der Bereich zwischen ca. 400 und 1.000 Metern angesetzt. Aufgrund der im Vergleich zur oberflächennahen Geothermie größeren Tiefen werden höhere Gebirgstemperaturen erschlossen, wodurch beispielsweise Wärmepumpen mit signifikant besseren Wirkungsgraden betrieben werden können. Zudem wird weniger Platz für die Errichtung der Anlage benötigt. Eine direkte Kühlung (freie Zirkulation des Wärmeträgers, keine Kompressionskälte) ist über mitteltiefe Erdwärmesonden in der Regel nicht bzw. nur sehr eingeschränkt möglich, weil die Untergrundtemperaturen dafür meist zu hoch sind. Für die Stromerzeugung oder eine direkte Wärmenutzung sind die Untergrundtemperaturen jedoch noch deutlich zu gering.

Aufgrund der größeren Tiefe ist auch der bohrtechnische Aufwand deutlich höher als bei den oberflächennahen Erdwärmesonden. Weiterhin werden durch die größeren Tiefen im Vergleich zu oberflächennahen Erdwärmesonden höhere Soledurchsätze je Sonde erforderlich. Dieser Umstand und der tiefenbedingte, höhere Gebirgsdruck erfordern den Einsatz anderer Sondentypen als im oberflächennahen Bereich. Um die hydraulischen Druckverluste beim Durchströmen der Sonden möglichst gering zu halten, werden größere durchströmbare Querschnitte benötigt. Zudem ist eine erhöhte Außendruckfestigkeit erforderlich.

Folglich kommen in aller Regel Koaxialsonden (Abbildung 3), neuerdings auch speziell angepasste Hochdruck-Tiefensonden in doppel- oder einfach-U-Ausführung zum Einsatz. Übliche Ausführungen liegen bei den Koaxialsonden im Bereich DA 75 mm … DA 110 mm, bei den U-/doppel-U-Sonden im Bereich DA 40 … 63 mm.

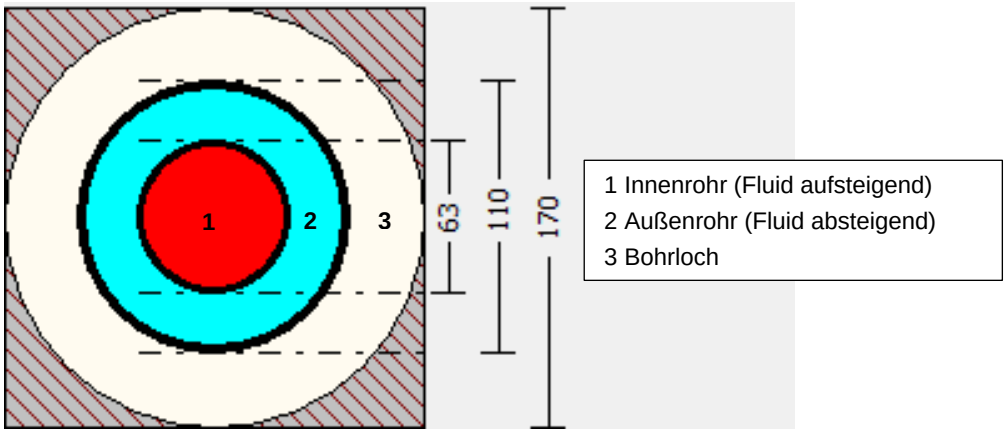



**Abbildung 3: Schematischer Aufbau einer Koaxialsonde**

### 4.1.3 Brunnenanlagen

Im Gegensatz zu den beiden erstgenannten stellen die Brunnenanlagen ein so genanntes offenes System dar. Als Wärmeträger fungiert hier direkt das Grundwasser. Es wird über einen oder mehrere Förderbrunnen direkt aus dem Grundwasserleiter entnommen und nach dem Wärmeentzug mit einer Temperaturdifferenz von meist 3 bis 6 K über entsprechende Injektions- oder Schluckbrunnen wieder direkt dem Grundwasserleiter zugeführt (Abbildung 4). Weil das Grundwasser im Jahresverlauf eine nahezu konstante Temperatur besitzt (im Mittel etwa 10 °C), steht unabhängig von der Nutzungsdauer der geothermischen Anlage ein weitgehend gleichbleibendes Temperaturregime zur Verfügung.

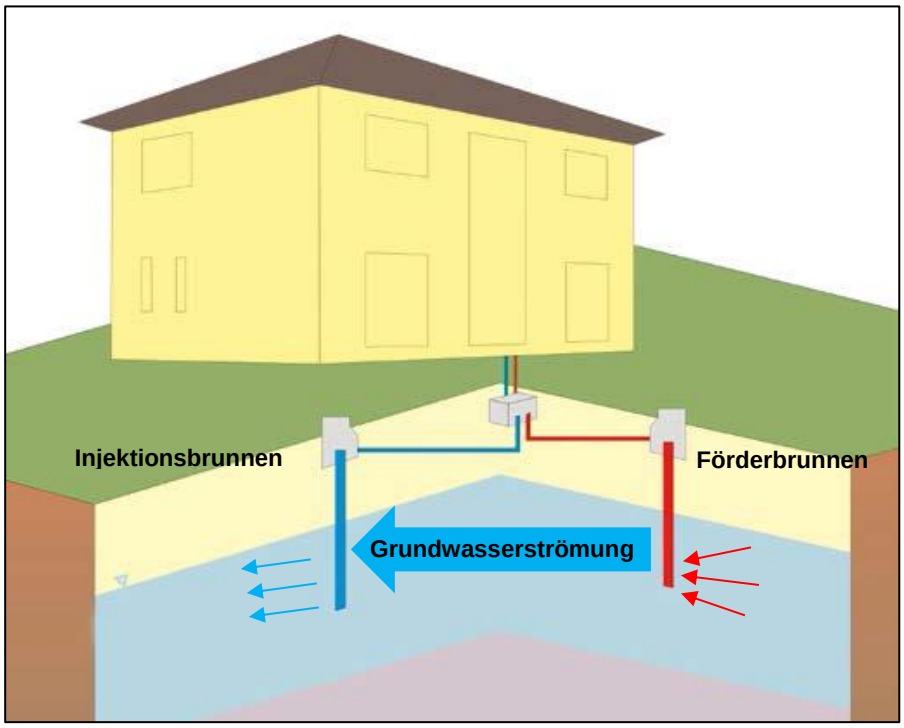



**Abbildung 4: Schematischer Aufbau einer Brunnenanlage (Quelle: verändert nach LfULG 2014)**

Grundvoraussetzung für eine direkte Grundwassernutzung ist das Vorhandensein eines entsprechend ergiebigen und hinsichtlich der Grundwasserbeschaffenheit geeigneten Grundwasserleiters. Besonders letzteres wird in der Praxis häufig unterschätzt und führt nicht selten zu deutlichen Funktionseinschränkungen (meist der Injektionsbrunnen) nach mehrjährigem Betrieb. In Kapitel 4.3 wird darauf für alle drei Modellgebiete ausführlich eingegangen.

Im Gegensatz zu den offenen Wärmequellensystemen erfordern die Brunnenanlagen eine zyklische Wartung (Reinigung/Regenerierung in meist mehrjährigem Turnus). Zudem ist in den Förderbrunnen je eine, auf die Anforderungen der Wärmepumpe abgestimmte Pumpe notwendig.

Der Planungs- und Erkundungsaufwand ist bei den Brunnenanlagen meist höher als bei den Erdwärmesondensystemen.

## 4.2 Projektbezogene Randbedingungen/Spezifizierungen der Wärmequellensysteme

### 4.2.1 Wärmepumpentechnik

Um eine möglichst breite und ökonomische Geothermienutzung im Gartenbau zu erforschen und letztlich die Möglichkeiten der praxistauglichen Realisierbarkeit aufzuzeigen, werden allein am Markt verfügbare „Standard-Wärmepumpen“ berücksichtigt (keine Sonderanfertigungen).

Aufgrund der geringeren erforderlichen Kälteleistung erschien die Nutzung von Gasabsorptionswärmepumpen im Vergleich mit elektrisch betriebenen Wärmepumpen im Vorfeld als vielversprechende Variante (geringere Investitionskosten aufgrund des geringeren Umfangs der Wärmequellen). Die Ergebnisse der letzten Gartenbauerhebung 2005 zeigten jedoch, dass nur sehr wenige Gartenbaubetriebe über einen Erdgasanschluss verfügen. Von den damals erfassten 601 Betrieben, deren Gewächshäuser mit Heizungsanlagen ausgestattet waren, setzten lediglich 100 Erdgas ein.

Auch im Rahmen des Projekts „Erarbeitung von allgemeinen Empfehlungen zur Verbesserung der Energieeffizienz in sächsischen Zierpflanzenbaubetrieben“ aus dem Jahr 2011 zeigt sich ein ähnliches Resultat. Der Anteil von Erdgas an den Gesamtenergiekosten der untersuchten sächsischen Zierpflanzenbaubetriebe lag nur bei ca. 5 % und liegt somit weiter hinter anderen Energieträgern wie Heizöl (Anteil > 50 %) oder Kohle (Anteil ca. 17 %).

Im Ergebnis beider Datenerhebungen erscheint die Berücksichtigung von Gasabsorptionswärmepumpen nicht gerechtfertigt. Stattdessen wird grundsätzlich vom Einsatz elektrisch betriebener Wärmepumpen ausgegangen.

Für alle Sole-Wasser-Wärmepumpen wird grundsätzlich eine Jahresarbeitszahl von 3,8 angesetzt. Bei den Wasser-Wasser-Wärmepumpen findet eine Jahresarbeitszahl von 5,0 Verwendung. Bei letzteren wird die Leistungsaufnahme der Unterwasserpumpe in den Förderbrunnen jeweils spezifisch gemäß den jeweiligen Anforderungen zusätzlich berücksichtigt. Sie fließt nicht in die Jahresarbeitszahl ein.

### 4.2.2 Oberflächennahe Erdwärmesonden

Im vorangestellten Kapitel wurden die Grundzüge der drei zu betrachtenden Wärmequellensysteme bereits erläutert. Bezogen auf die konkreten Standort- und Anwendungsbedingungen im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen sind jedoch bei allen drei Systemen einige Spezifizierungen/konkrete Festlegungen erforderlich.

Für die oberflächennahen Erdwärmesonden werden Doppel-U-Sonden vom Typ 4 x 32 x 3 mm (PE 100-RC oder PE-Xa) angesetzt – Druckfestigkeit: 16 bar. Die Auswahl der Sondentypen begründet sich aus der erfolgten Berechnung der Druckverluste. Diese erfolgte nicht für jede berechnete Sondenanlage, sondern stichpunktartig. Zielstellung sind generell leicht turbulente Verhältnisse bei minimalem Rohrreibungsverlust. Unter Berücksichtigung des o. g. Sondentyps ergeben sich z. B. für den Betrieb C am Standort X (Variante mit 70 kW Heizleistung) Druckverluste in einer Sonde mit 132 m Tiefe in Höhe von 565 mbar. Die Strömungsverhältnisse sind leicht turbulent (Reynoldszahl: 2641). Für den gleichen Betrieb am Standort Z werden aufgrund der dort höheren Sondenzahl (bei gleicher Leistung der Wärmepumpe) laminare Verhältnisse berechnet (Reynoldszahl: 1541). Der Druckverlust beträgt daher nur 169 mbar. Generell werden die mitunter auftretenden, laminaren Strömungsverhältnisse in den Sonden toleriert. Dies ist insofern zulässig, als dass **alle** erfolgten Anlagenberechnungen (gilt auch für die mitteltiefen Sonden) auf ein „Zieltemperaturspektrum“ nach

25-jährigem Betrieb zwischen 0 °C und ca. +1 °C ausgelegt sind und somit einen leicht konservativen Charakter besitzen (eine exakte Auslegung/Berechnung auf einen konkreten Wert ist modelltechnisch kaum möglich). Zudem dürfen die Berechnungen der Reibungsverluste nicht überbewertet werden, weil sie anhand der Angaben zum minimal erforderlichen Soledurchsatz eines Wärmepumpenherstellers erfolgten und zwischen den verschiedenen Herstellern hier durchaus Unterschiede bestehen.

Die Einbautiefen der Sonden werden generell auf 130 m bis 140 m beschränkt. Dies basiert auf der Bauartzulassung der üblichen, am Markt verfügbaren Produkte auf 16 bar. Es verbleiben somit ausreichende Reserven für den Anlagenbetriebsdruck (meist etwa 2 bis 3 bar). Als Wärmeträger ist generell ein Wasser-Glykol-Gemisch verwendet worden (Dichte: 1.052 kg/m³, dynamische Viskosität: 4839E-06 kg/ms).

### 4.2.3 Mitteltiefe Erdwärmesonden

Als mitteltiefe Erdwärmesonden kommen Hochdruck-Tiefenkoaxialsonden zur Anwendung (Druckfestigkeit: je nach Typ 60 bis 100 bar).

Die Auswahl der Sondentypen begründet sich auch hier aus der erfolgten Berechnung der Druckverluste. Demnach kommt bei den Koaxialsonden der Typ 110/63 mm (Außenrohrdurchmesser/Innenrohrdurchmesser) zum Einsatz. Kleinere Dimensionierungen bedingen Druckverluste im Solekreis von mehr als 4 bar (das ausgewählte System liegt nur bei ca. 1/3 der Druckverluste). Grundsätzlich wären auch größer dimensionierte Außen- und Innenrohre möglich. Dies führt jedoch zu einem massiven bohrtechnischen Mehraufwand und damit zu deutlich steigenden Kosten.

Der Wärmeträger (Sole) ist identisch zu den oberflächennahen Sonden. Als Zielgröße für die Einbautiefe der Sonden werden minimal ca. 400 m angesetzt. Teilweise mussten im Sinne einer optimalen Anlagenberechnung jedoch auch etwas geringere Tiefen berücksichtigt werden, weil es sonst zu einer deutlichen Über- oder Unterdimensionierung gekommen wäre.

### 4.2.4 Brunnenanlagen

Bei den Brunnenanlagen sind wie auch bei den o. g. Systemen durchweg sehr hochwertige Standardprodukte berücksichtigt worden. Insbesondere bei den Brunnen kommt einer entsprechenden Materialwahl eine große Bedeutung zu, weil es sich nicht um wartungsfreie Bauwerke handelt. Nur bei Auswahl geeigneter Produkte werden ein nachhaltig sicherer Betrieb und eine geeignete Wartbarkeit möglich. Gleiches gilt für eine angepasste technische/bohrtechnische Realisierung.

Für die Brunnenanlage gelten somit grundsätzlich die folgenden technischen/bohrtechnischen Spezifizierungen:

- Zur exakten Bemessung von Brunnenausbau und Ringraumgestaltung werden Vorbohrungen konzipiert (bei mehreren Brunnen je Standort jedoch nicht für jeden Brunnen).
- Es werden grundsätzlich Edelstahl-Wickeldrahtfilter in der Qualität V2A eingesetzt.
- Durchmesser und Länge der Filterrohre werden großzügig bemessen, um die Absenkungen (Aufhöhungen bei den Injektionsbrunnen) so gering wie möglich zu halten.
- Es werden Sumpfrohre gleicher Materialgüte verwendet.
- Über den Filterrohren schließen sich jeweils 4 m Vollrohr gleicher Materialgüte an. Die gesamte Einheit vom Sumpfrohr bis zum Edelstahl-Vollrohr ist in Ausführung und Bauart für alle gängigen Regenerierungsmaßnahmen geeignet. Bei ordnungsgemäßem Betrieb ist somit eine sehr lange Standzeit der Brunnen möglich.

- Der weitere Brunnenausbau bis zur Geländeoberfläche (bis zum Schachtbauwerk) erfolgt in PVC.
- Als Abschlussbauwerke werden kompakte Brunnenstuben in Ausführungen um DN 1.000 mm bis 1.500 mm eingesetzt. Sie erlauben einen hygienisch einwandfreien Abschluss und den sicheren Einbau der nötigen Technik/Anschlüsse.
- Für alle Brunnen werden Messsysteme zur Erfassung der Grundwasserstände vorgesehen, für die Förderbrunnen werden jeweils angepasste Unterwassermotorpumpen konzipiert.
- Eine fachgerechte, umfangreiche Entwicklung/Entsandung der Brunnen einschließlich Pump- und Auffüllversuchen wird vorgesehen.

## 4.3 Hydrochemische Betrachtungen und Aufbereitungstechnik

Wie bereits im vorangestellten Kapitel aufgeführt, wird bei der offenen Grundwassernutzung über Brunnenanlagen größter Wert auf eine funktionssichere Auslegung insbesondere der Brunnen gelegt. Dies setzt neben der quantitativen Eignung der Grundwasserleiter auch günstige qualitative Eigenschaften des Grundwassers voraus.

Weil die Modellregion Z (Festgesteinsbereich) von der offenen Grundwassernutzung ausgenommen wurde, lagen für die Modellregionen X und Y jeweils repräsentative Grundwasseranalysen vor. Sie sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst.

**Tabelle 6: Grundwasserbeschaffenheit – Modellregionen X und Y**

| Parameter | Einheit | Region X (Sand von 1–10 m Tiefe) | Region X (Kies von 10–20 m Tiefe) | Region Y (bedeckter GWL) |
|---|---|---|---|---|
| el. LF | µS/cm | 863 | 666 | 1734 |
| pH | - | 6,6 | 6,9 | 6,6 |
| $O_2$ | mg/l | 2,5 | 0,65 | - |
| Eh | mV | - | 352,5 | 144,87 |
| T | °C | 11,75 | 11,58 | 10,45 |
| $Cl^-$ | mg/l | 58,13 | 54,8 | 66,73 |
| $SO_4^{2-}$ | mg/l | 225 | 152,58 | 724,82 |
| $NO_3^-$ | mg/l | 12,13 | 63,36 | 18,87 |
| $HCO_3^-$ | mg/l | 116,05 | 88,16 | 162,86 |
| $Na^+$ | mg/l | 36,8 | 29,67 | 54,82 |
| $K^+$ | mg/l | 3,5 | 2,56 | 9,82 |
| $Ca^{2+}$ | mg/l | 87,5 | 108,21 | 242,14 |
| $Mg^{2+}$ | mg/l | 30,5 | 23,73 | 62,26 |
| Fe (ges.) | mg/l | 0,87 | 0,06 | 63,04 |
| $Mn^{2+}$ | mg/l | 0,27 | 0,059 | 0,76 |
| $Al^{3+}$ | µg/l | <30 | <30 | 36,26 |

Wie zu erkennen ist, ist das Grundwasser in der Modellregion X deutlich anthropogen beeinflusst (z. B. Sulfat- und Chloridkonzentrationen). Für die Modellregion Y kommt zum anthropogenen Einfluss vermutlich noch eine bergbaubedingte Beeinflussung hinzu (z. B. auffallend hohe Sulfat- und Eisenkonzentrationen).

Zur Untersuchung der hydrochemischen Verhältnisse im Grundwasser – insbesondere der Sättigungsverhältnisse der Mineralphasen – erfolgten entsprechende hydrochemische Modellierungen der Rohwasseranalysen unter Verwendung der Software PhreeqC.

Weil für die **Modellregion X** zwei Analysen des gleichen GWL in verschiedenen Tiefen vorlagen, ist für die Berechnungen die höher mineralisierte Analyse aus den von 1 bis 10 m Tiefe reichenden Sanden verwendet worden.

Im Ergebnis war festzustellen, dass für den **Standort X** schon im natürlichen Zustand eine Übersättigung der Eisenphasen vorhanden ist (amorphes Eisenhydoxid - SI: +2,53, Goethit – SI: +7,93). Sie neigen somit bereits im natürlichen Zustand zur Ausfällung und stellen daher ein deutliches Potenzial zur Verockerung der Brunnen/Wärmetauscher dar.

Um den Einfluss der Temperaturänderung des Grundwassers im Heiz-, aber auch im Kühlbetrieb zu untersuchen, erfolgte eine erneute Modellierung der Sättigungsverhältnisse bei einer Verringerung und Erhöhung der Grundwassertemperatur um 6 K. Im Heizbetrieb (das heißt einer Abkühlung des Grundwassers) verschlechtern sich die ohnehin bereits ungünstigen Verhältnisse weiter. Die Übersättigung der o. g. Eisenphasen steigt noch einmal deutlich an (amorphes Eisenhydoxid - SI: +3,36, Goethit – SI: +8,52). Zudem sind nun auch einige Manganphasen übersättigt (z. B. Manganit - SI: +3,19, Pyrolusit – SI: +4,66). Auch für den Kühlbetrieb (Aufheizung des Grundwassers) zeigt sich ein ähnliches Bild.

Alle Berechnungen erfolgten in analoger Form auch für die **Modellregion Y**. Auch hier ist bereits im natürlichen Zustand eine deutliche Übersättigung der o. g. Eisenphasen vorhanden. Die Manganphasen sind noch nicht übersättigt. Bei der Aufheizung bzw. Abkühlung des Grundwassers um 6 K zeigt sich ein analoges Verhalten wie für die Modellregion X, obgleich die Zunahme der Übersättigung jetzt noch stärker ausfällt. Auch die Manganphasen sind wieder deutlich übersättigt.

Aufgrund der hohen Eisenkonzentrationen im Grundwasser der Modellregion Y (63 mg/l) erfolgten weiterführende Recherchen hinsichtlich zusätzlicher Vollanalysen des Grundwassers. Gänzlich abweichende Daten konnten jedoch nicht recherchiert werden. Um dennoch eine alternative Betrachtung durchführen zu können, erfolgt die zusätzliche Bewertung der Wasseranalyse einer Grundwassermessstelle im Leipziger Norden, welche im Quartär ausgebaut ist (Messstelle eines Kiestagebaus). Sie weist einen Eisengehalt von 4,2 mg/l auf und ist nicht durch den Braunkohlenabbau beeinträchtigt.

Nach erfolgter hydrochemischer Modellierung (analog zum o. g. Vorgehen) wurden faktisch analoge Sättigungsverhältnisse für die „kritischen“ Mineralphasen berechnet wie bei den bereits erfolgten Betrachtungen.
Generell fallen die meisten Mineralphasen aufgrund der Reaktionskinetik nicht unbedingt spontan aus (gilt vor allem für die Manganphasen), die Neigung zur Ausfällung besteht jedoch.

**Fazit**

Für beide Modellregionen (X und Y) ist eine offene Grundwassernutzung ohne vorherige Aufbereitung nicht möglich bzw. nicht betriebssicher. Es wird somit für beide Regionen eine angepasste Enteisenung (bzw. Entmanganung) konzipiert.

## 4.4 Berechnungsverfahren/eingesetzte Software

Wesentliche Bearbeitungsschwerpunkte im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen lagen zum einen auf der

- **detaillierten Berechnung des Energiebedarfs der einzelnen Modellbetriebe A bis D (bei C und D jeweils mit vorgeschalteter Gewächshausplanung), zum anderen auf der**
- **geothermischen Modellierung der Wärmequellensysteme.**

Die Belastbarkeit der Ergebnisse beider Bearbeitungsschritte stellt die wichtigste Grundlage für zuverlässige Betrachtungen zur Wirtschaftlichkeit dar. Es waren somit entsprechend geeignete/zuverlässige Simulationswerkzeuge zu verwenden.

Für die Energiebedarfsberechnungen/die Planung der Gewächshausanlagen fand das Simulationsprogramm HORTEX (Version 4.1) Verwendung. Bei HORTEX handelt es sich um ein computergestütztes Beratungssystem für die Planung und den Betrieb von Gewächshausheizungsanlagen. Es wurde im Rahmen des Forschungsprojektes „Gartenbautechnische Expertensysteme“ (RATH 2005) entwickelt und kombiniert konventionelle Simulationsmodelle mit wissensbasierten Darstellungstechniken.

Für die geothermischen Modellierungen der Wärmequellensysteme fand grundsätzlich für alle Standorte das numerische Simulationsprogramm FEFLOW (Version 6.2) Verwendung. Grundlegender Vorteil dieses Systems ist es, dass alle drei Wärmequellensysteme unter allen gegebenen Standortverhältnissen damit zuverlässig und räumlich sowie zeitlich hoch auflösend und extrem flexibel berechnet werden können.

Bei FEFLOW handelt es sich um ein komplexes dreidimensionales Grundwasserströmungs- und Stofftransportmodell (einschließlich Wärmetransport) auf der Basis finiter Elemente. Durch den Einsatz von FEFLOW können vorgegebene geologische Strukturen und auch zeitlich hoch auflösende Energiebedarfsprofile detailliert umgesetzt werden. Gleiches gilt für die räumliche Anordnung der geothermischen Entzugssysteme. Grundsätzlich wird der Anteil der Grundwasserströmung am Wärmetransport explizit berücksichtigt. Ferner können komplexe geologische und hydrogeologische Untergrundverhältnisse detailliert berücksichtigt/umgesetzt werden. Im Hinblick auf die zu betrachtenden Wärmequellensysteme sind alle dazu notwendigen Modellierungswerkzeuge für Erdwärmesonden und Brunnenanlagen im Programm implementiert.

Eine ausführliche Modelldokumentation ist im Anlagenband (6) enthalten.

# 5 Modellbetrieb A (Bestehende Einzelhandelsgärtnerei – Zierpflanzenbau)

## 5.1 Energiebedarfsberechnung

Wie bereits unter Kapitel 2.1 dargestellt, handelt es sich beim Modellbetrieb A um eine historisch gewachsene Einzelhandelsgärtnerei im Zierpflanzenbau. Die Betriebsstruktur spiegelt die vieler sächsischer Gärtnereien wider, welche auf einer Altsubstanz aufbauen und modernisiert wurden. Die produzierten Waren werden vorwiegend über die Direktvermarktung im angeschlossenen Verkaufsgewächshaus abgesetzt. Die hauptsächlich produzierten Zierpflanzenkulturen sind Frühjahrsblüher, Beet- und Balkonpflanzen, Cyclamen und Weihnachtssterne.

Die Berechnungen zur Ermittlung der notwendigen Wärmeleistung und des Heizenergieverbrauchs erfolgten mit dem Simulationsprogramm HORTEX 4.1. Die Ergebnisse der Simulationsrechnungen (siehe Anlagenband [3.1]) basieren auf den konstruktiven und technischen Daten der Gewächshausanlage, den für die gärtnerische Produktion geforderten Innentemperaturen und der Normaußentemperatur für den Standort der Gärtnerei (DIN 4701 bzw. EN 12831) im Testreferenzjahr (Jahresklimadatensatz GLOTESI). Die für die Simulationsrechnung zugrunde gelegten Temperaturprogramme sind im Anlagenband (1.1) zusammengestellt.

Für die folgenden Simulationsrechnungen wurden der Heizkreis des Wohn- und Geschäftsgebäudes nicht berücksichtigt. Unter Beachtung einer Normaußentemperatur am Standort der Gärtnerei von -14 °C (nach DIN 4701), Auslegungstemperaturen in den Gewächshauskabinen zwischen 8 und 20 °C, errechnet sich unter Berücksichtigung der Temperaturprogramme eine notwendige Gesamtheizleistung für den Betrieb von **470 kW** (Tabelle 7). Die Ergebnisse aller Simulationsrechnungen sind im Anlagenband (3.1) in Form stundengenauer Werte der nötigen Heizleistung hinterlegt. Es wird angenommen, dass die Wärmeversorgung der Gewächshausanlage der Gärtnerei durch zwei gasbefeuerte Niedertemperatur-Heizkessel mit einer Gesamtleistung von 470 kW gesichert wird. Die bestehenden Heizsysteme (Rohrheizsysteme, Luftheizer u. a.) erfordern für das Erreichen der benötigten Heizleistung zumindest zeitweise Vorlauftemperaturen von bis zu 80 °C.

**Tabelle 7: Modellbetrieb A – Ergebnisse der Heizlastberechnungen mit HORTEX 4.1**

| | Auslegungsleistung (kW) | Heizleistung im Abtaufall (kW) | Heizenergieverbrauch (kWh) | Heizenergieverbrauch (kWh pro m² und Jahr) |
|---|---|---|---|---|
| Haus 1 | 120,8 | | 65.335 | 123 |
| Haus 2 | 119,2 | | 239.830 | 425 |
| Haus 3 | 72,9 | | 42.550 | 169 |
| Haus 4 | 54,8 | | 29.147 | 116 |
| Verbinder | 11,7 | | 15.133 | 189 |
| Verkauf | 76,3 | | 138.135 | 345 |
| Gesamtbedarf | *470* | *584* | *530.130* | *258* |

Wie in Abbildung 5 zu erkennen ist, tritt die Maximalleistung von 470 kW nur sehr kurzzeitig auf (einmalig an einem kalten Morgen Mitte Januar, kurz nach Sonnenaufgang). Auch die übrigen Leistungsspitzen, mehrfach im Bereich um 400 kW, sind nur sehr kurzzeitig erforderlich. In der Jahresbilanz ergibt sich eine insgesamt zu erbringende Heizarbeit von 529.653 kWh. Der Bereich unterhalb der im Diagramm rot gekennzeichneten Linie markiert das Leistungsspektrum der Wärmepumpe (Grundlast) mit einer Leistung von 140 kW.

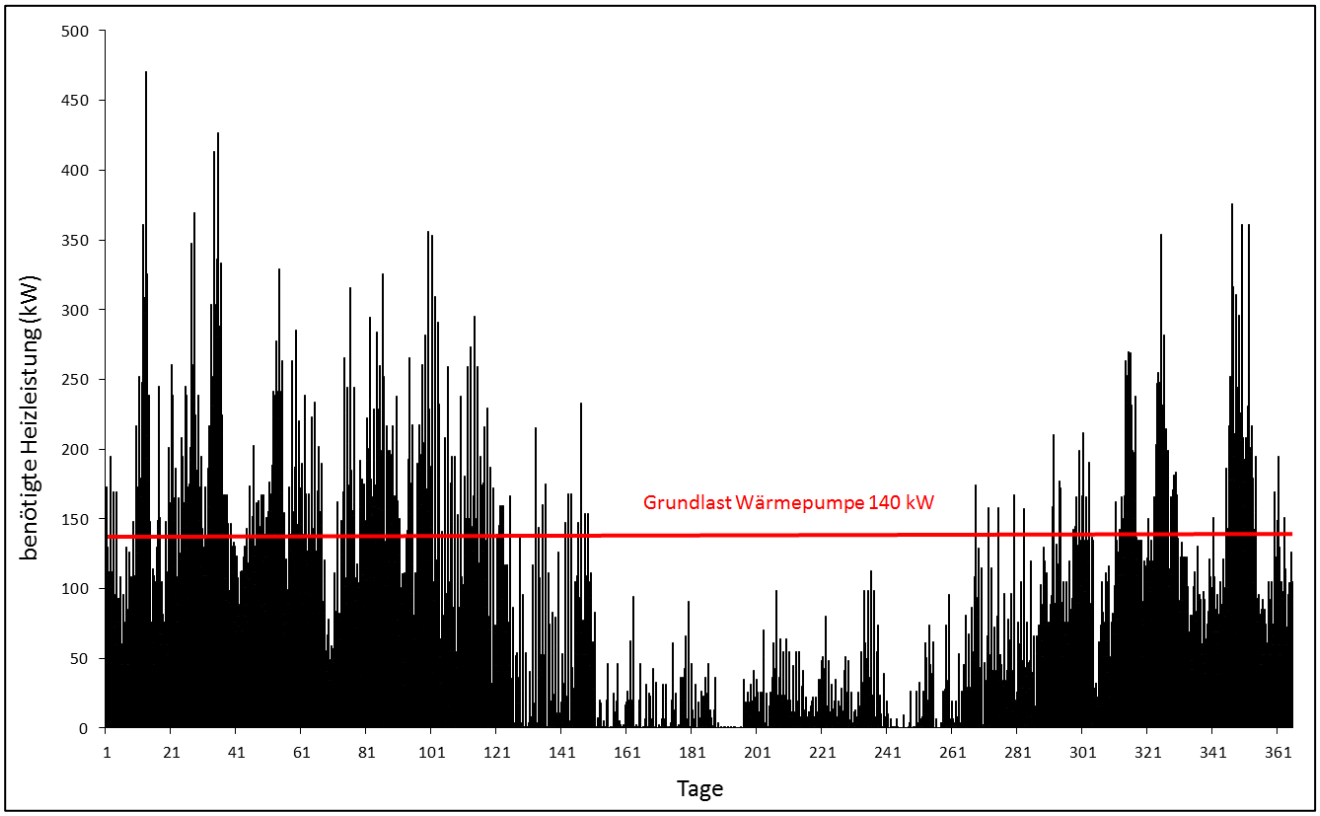



**Abbildung 5: Energiebedarf Modellbetrieb A im Jahresverlauf (Stundenwerte)**

Grundsätzlich sind für den Modellbetrieb A zwei verschiedene Grund-/Spitzenlastszenarien berücksichtigt. Es wurde in der ersten Variante von einem bivalent parallelen Betrieb ausgegangen, in der zweiten Variante von bivalent alternativem Betrieb. Beide Varianten unterscheiden sich deutlich in der Lastabdeckung.

Beim **bivalent parallelen Betrieb** arbeiten beide Wärmeerzeuger (Wärmepumpe und konventionelles System) gleichzeitig (parallel). Im **bivalent alternativen Betrieb** wird die Grundlastabdeckung über die Wärmepumpe vollständig vom konventionellen Spitzenlastsystem (z. B. Heizölkessel) abgelöst, wenn der Wärmebedarf über die Wärmepumpe nicht mehr gedeckt werden kann. Beide Heizsysteme laufen also nicht gemeinsam.

Die Abbildung 6 zeigt den Anteil der Jahresheizarbeit bei verschiedenen Heizleistungen der Wärmepumpe bei bivalent paralleler (rot) und bei bivalent alternativer (blau) Betriebsweise. Die unterbrochenen Signaturen in rot (bivalent parallel) bzw. blau (bivalent alternativ) zeigen die Abdeckung der Jahresheizarbeit bei einer ausgewählten Wärmepumpenleistung von 140 kW. Tabellarisch dargestellt ist die der Wärmepumpenleistung entsprechende Abdeckung der Jahresheizarbeit bei beiden untersuchten Betriebsweisen (blau bzw. rot unterbrochene Signatur). Im bivalent parallelen Betrieb werden 89 % der Gesamtlast durch den Wärmepumpenbetrieb abgedeckt, im bivalent alternativen Betrieb 59 %.

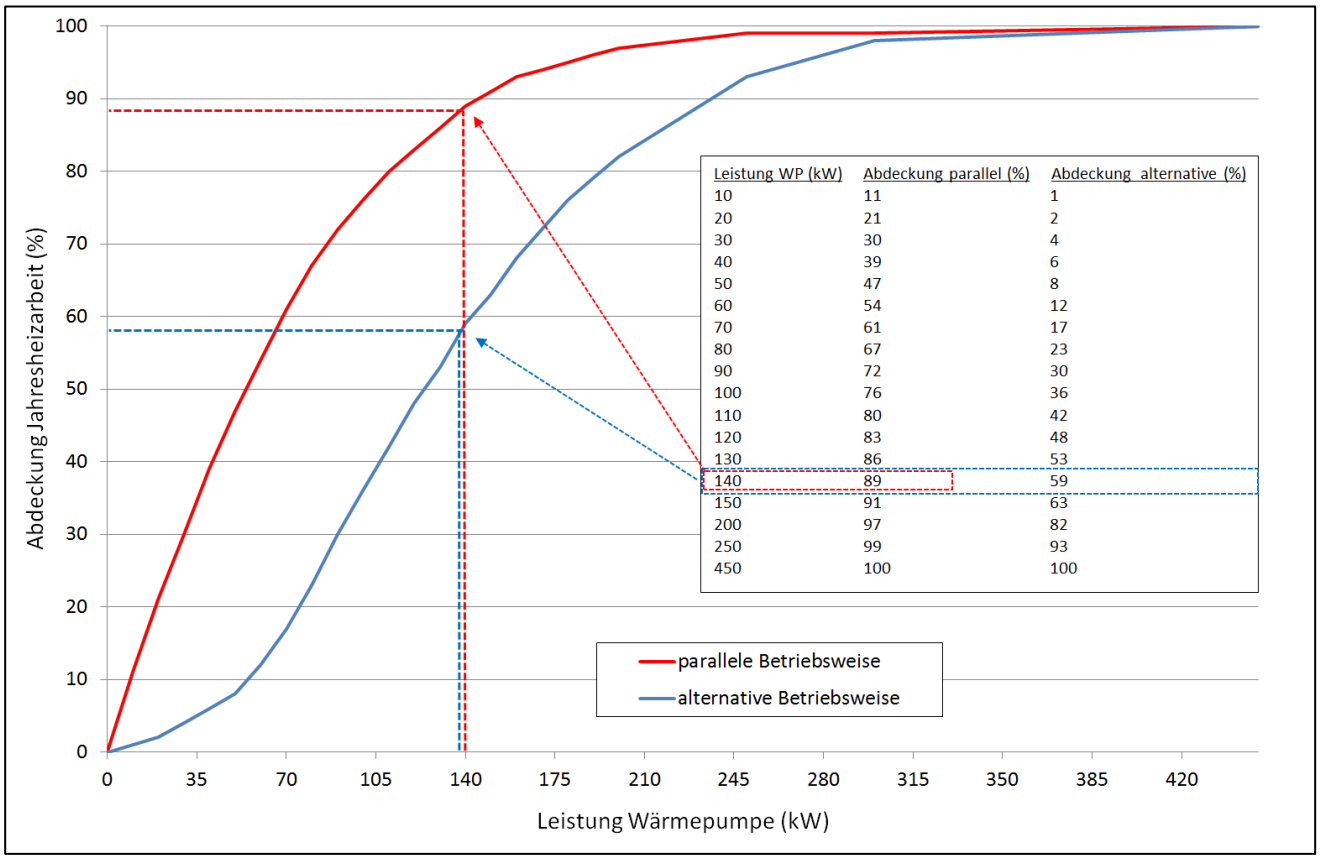



**Abbildung 6: Modellbetrieb A – Heizleistung und Lastabdeckung für bivalent alternativen und parallelen Betrieb**

### Bivalent paralleler Betrieb

Für den bivalent parallelen Betrieb liegt die Lastabdeckung an der Gesamtheizarbeit bei ca. 89 % und ist damit deutlich höher als beim alternativen Betrieb mit etwa 59 %.

In der Abbildung 7 ist die Jahresdauerlinie für den Modellbetrieb A dargestellt. Die grün hinterlegte Fläche stellt dabei die geothermische Grundlastabdeckung bei einer Wärmepumpenleistung von 140 kW im bivalent parallelen Betrieb dar. Die darüber liegende Fläche repräsentiert den Spitzenlastbereich, der konventionell abgedeckt werden muss. Unter Beachtung der berechneten Lastprofile (Stundenschritte – siehe Anlagenband [3.1]) ergibt sich eine geothermisch zu erbringende **Heizarbeit von ca. 470.332 kWh im Jahr.**

Ein vereinfachtes Anlagenschema ist in der Abbildung 8 dargestellt. Hierbei ist zu betonen, dass die Auswahl und Positionierung der Soleumwälzpumpen jeweils für den Einzelfall individuell angepasst werden muss.

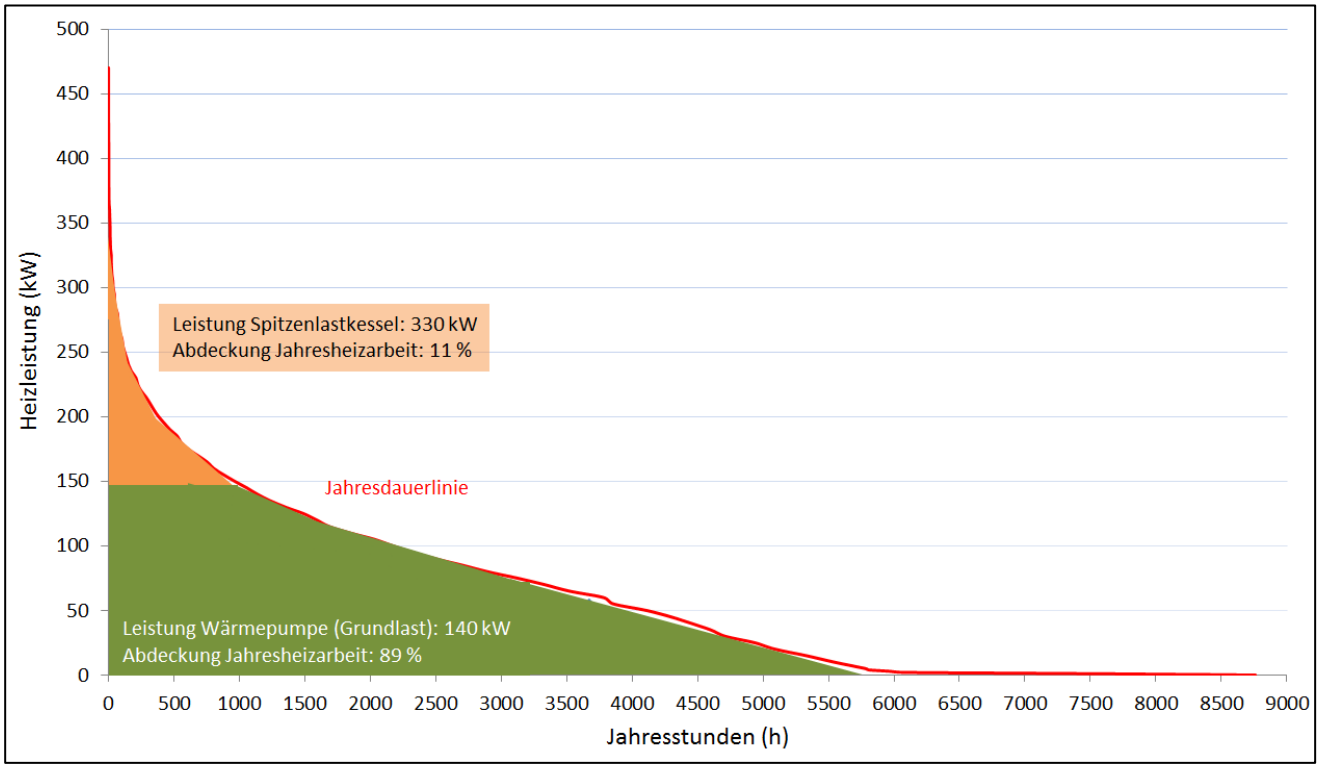



**Abbildung 7: Jahresdauerlinie mit Darstellung der Lastabdeckung (Betrieb A, bivalent parallel)**

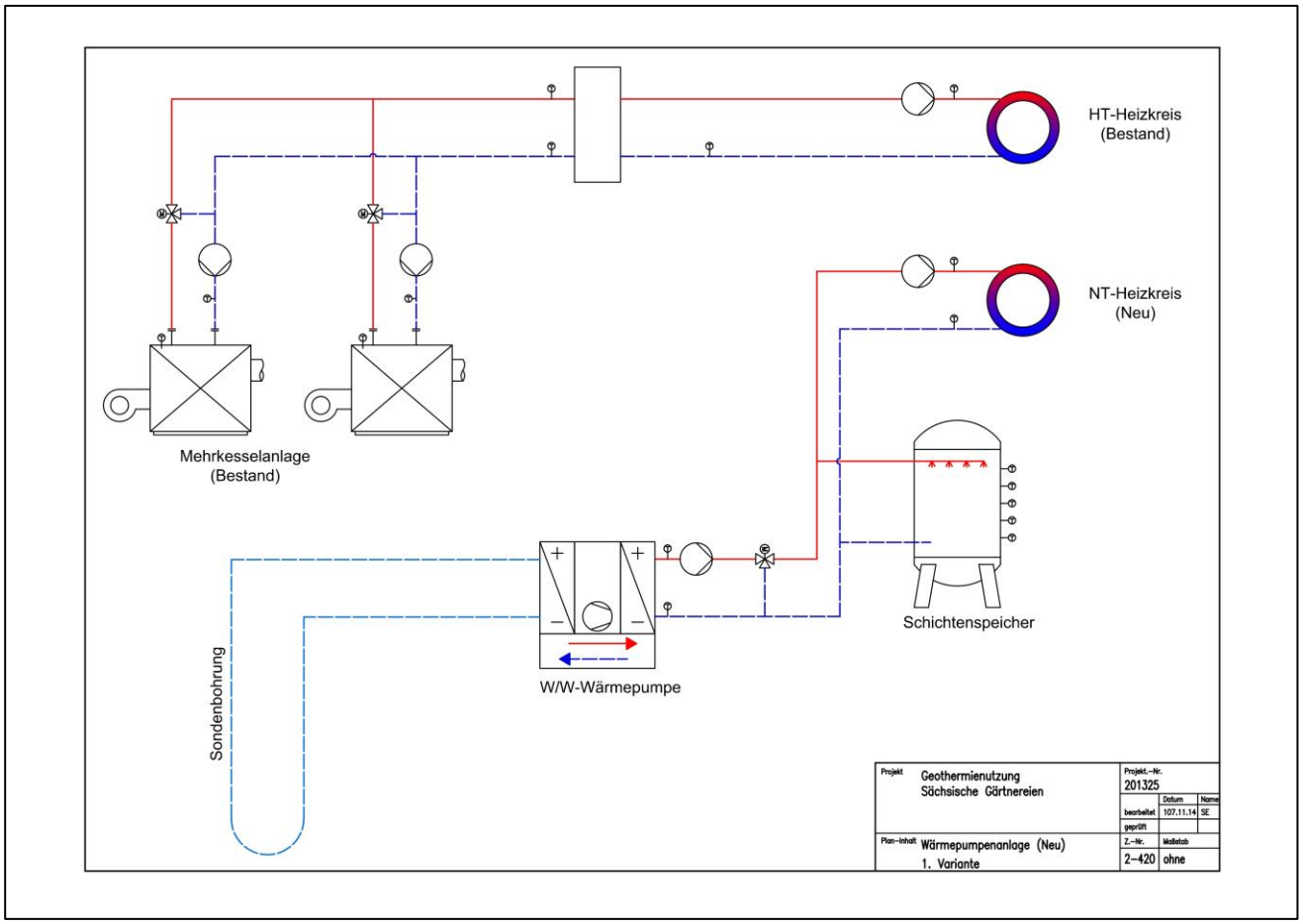



**Abbildung 8: Heizungsschema (bivalent parallel) für Integrierung einer Wärmepumpe in bestehendes Heizungssystem – Modellbetrieb A**

In der Abbildung 9 ist exemplarisch die Abhängigkeit des Grundlastanteils und der Volllaststunden bei unterschiedlicher Nennleistungen von Wärmepumpen unter Berücksichtigung verschiedener Pufferspeichervolumina (10–30 m³ Speicherinhalt) dargestellt (bivalent paralleler Betrieb). Wie zu erkennen ist, nimmt der Anteil der Lastabdeckung ab einer Wärmepumpenleistung von ca. 140 kW nur noch gering zu. Der Einfluss der Auslegung des Pufferspeichers ist zwar erkennbar vorhanden, bei einer Varianz der Lastabdeckung um ca. 5 % jedoch eher gering.

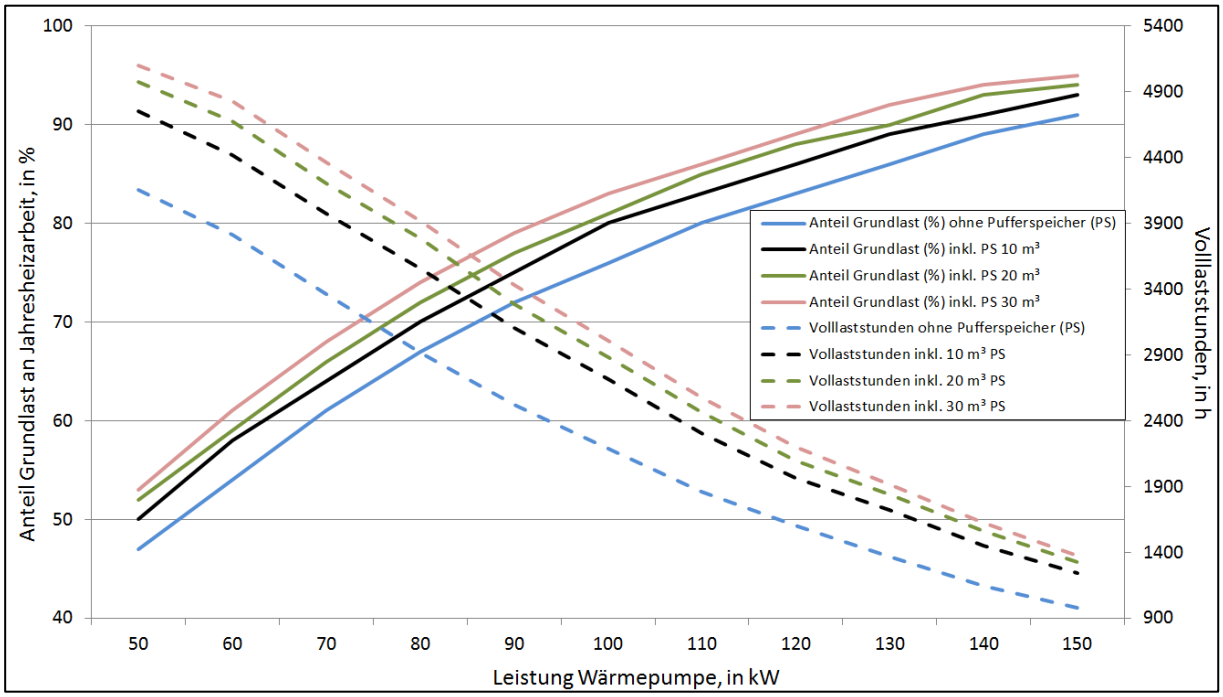



**Abbildung 9: Modellbetrieb A – Grundlastanteil und Volllaststunden unterschiedlicher Wärmepumpenleistungen und Pufferspeicher**

Weil es sich beim Modellbetrieb A um einen Bestandsbau handelt, wurden vor dem Hintergrund der Vergleichbarkeit verschiedener Wärmeversorgungssysteme neben dem Wärmepumpenbetrieb auch konventionelle Versorgungsmöglichkeiten betrachtet. Tabelle 8 gibt einen Überblick über die dabei betrachteten Versorgungskonzepte. In der Tabelle 9 sind die Ergebnisse der für das jeweilige System erfolgten Kesseldimensionierung enthalten.

**Tabelle 8: Untersuchte Wärmeversorgungskonzepte für den Modellbetrieb A beim bivalent parallelen Betrieb**

| Variante | Leistungsaufteilung | | Wärmebedarfsdeckung | |
|---|---|---|---|---|
| | Grundlast (%) | Spitzenlast (%) | Grundlast (%) | Spitzenlast (%) |
| Heizöl | 100 | 0 | 100 | 0 |
| Erdgas | 100 | 0 | 100 | 0 |
| Steinkohle + Heizöl | 30 | 70 | 90 | 10 |
| Pellets + Heizöl | 30 | 70 | 90 | 10 |
| Elektro-Wärmepumpe + Heizöl | 30 | 70 | 90 | 10 |
| Elektro-Wärmepumpe + Erdgas | 30 | 70 | 90 | 10 |

**Tabelle 9: Kesseldimensionierung für den Modellbetrieb A beim bivalent parallelen Betrieb**

| Variante | Leistungsaufteilung | |
|---|---|---|
| | Grundlast (kW) | Spitzenlast (kW) |
| Heizöl | 280 (frostfrei) | 280 (frostfrei) |
| Erdgas | 280 | 280 |
| Steinkohle + Heizöl | 140 | 360 |
| Pellets + Heizöl | 140 | 360 |
| Elektro-Wärmepumpe + Heizöl | 140 | 360 |
| Elektro-Wärmepumpe + Erdgas | 140 | 360 |

Die **$CO_2$-Bilanz** für die betrachteten Wärmeversorgungskonzepte ist in Tabelle 10 und in Abbildung 10 zusammengefasst. Die Bilanzen für den bivalent alternativen Wärmepumpenbetrieb sind in der Abbildung bereits mit aufgeführt.

Wie zu erkennen ist, liegt der $CO_2$-Ausstoß der geothermischen Nutzungskonzepte erwartungsgemäß durchweg deutlich unter dem bei ausschließlicher Nutzung fossiler Energieträger. Lediglich die Kombination aus Pellets und fossilen Energieträgern ist hinsichtlich des $CO_2$-Ausstoßes noch günstiger. Die Nutzungsoptionen unter Verwendung der Steinkohle haben den mit Abstand höchsten $CO_2$-Ausstoß.

**Tabelle 10: Wärmebedarf und $CO_2$-Emissionen beim bivalent parallelen Betrieb – Modellbetrieb A**

| **Energieträger** | **$CO_2$-Äquivalent inkl. Vorketten nach GEMIS 4.8, in kg pro kWh** | | | |
|---|---|---|---|---|
| Heizöl | 0,302 | | | |
| Erdgas | 0,224 | | | |
| Steinkohle | 0,438 | | | |
| Pellets | 0,041 | | | |
| Deutscher Strommix | 0,633 | | | |
| Ökostrom | 0,04 | | | |
| **Energievarianten** | **Energieverbrauch** | **Stromverbrauch, in kWh** | **$CO_2$-Ausstoß, in t pro a (Ökostromnutzung)** | **$CO_2$-Ausstoß, in t pro a (Nutzung Deutscher Strommix)** |
| Heizöl | 58.552 l/a | 11.191 | 178 | 185 |
| Erdgas | 62.004 m³/a | 11.191 | 144 | 151 |
| Steinkohle + Heizöl | 64.884 kg/a + 6.605 l/a | 23.172 | 272 | 286 |
| Pellets + Heizöl | 116.131 kg/a + 6.605 l/a | 23.385 | 45 | 59 |
| Elektro-Wärmepumpe (JAZ 3,8) + Erdgas | 6.994 m³/a | 145.453 | 22 | 108 |
| Elektro-Wärmepumpe (JAZ 3,8) + Heizöl | 6.605 l/a | 145.453 | 26 | 112 |

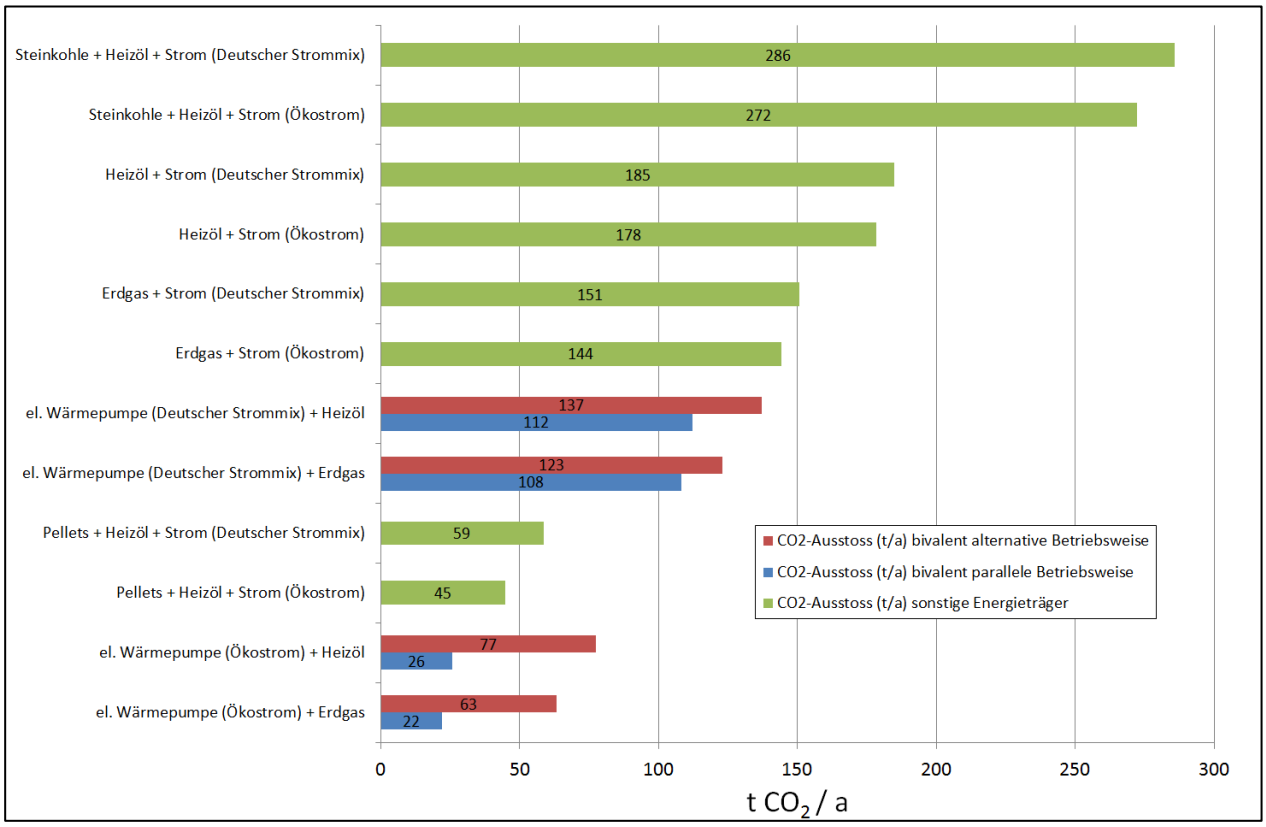



**Abbildung 10: $CO_2$-Ausstoß (t/a) unterschiedlicher Energievarianten – Modellbetrieb A**

### Bivalent alternativer Betrieb

Für den bivalent alternativen Betrieb liegt die Lastabdeckung an der Gesamtheizarbeit bei ca. 59 % und ist damit deutlich geringer als beim parallelen Betrieb.

In der Abbildung 11 ist die Jahresdauerlinie für den Modellbetrieb A dargestellt. Die grün hinterlegte Fläche stellt dabei die geothermische Grundlastabdeckung bei einer Wärmepumpenleistung von 140 kW im bivalent alternativen Betrieb dar. Die daneben liegende gelbe Fläche repräsentiert den Spitzenlastbereich, der konventionell abgedeckt werden muss. Die grün-gelb schraffierte Fläche stellt einen nicht quantifizierbaren Übergangsbereich dar, in dem ein bivalent paralleler Betrieb von Wärmepumpe und Spitzenlastkessel stattfindet (z. B. bei der Rücklaufanhebung der Spitzenlastkesselanlage). Aufgrund des geringen Lastanteils ist eine genauere Spezifizierung hier weniger relevant. Unter Beachtung der berechneten Lastprofile (Stundenschritte – siehe Anlagenband [3.1]) ergibt sich eine geothermisch zu erbringende **Heizarbeit von ca. 311.152 kWh im Jahr.**

Ein vereinfachtes Anlagenschema ist in der Abbildung 12 dargestellt. Wie bei allen Betrieben ist auch hier zu betonen, dass die Auswahl und Positionierung der Soleumwälzpumpen jeweils für den Einzelfall individuell angepasst werden muss.

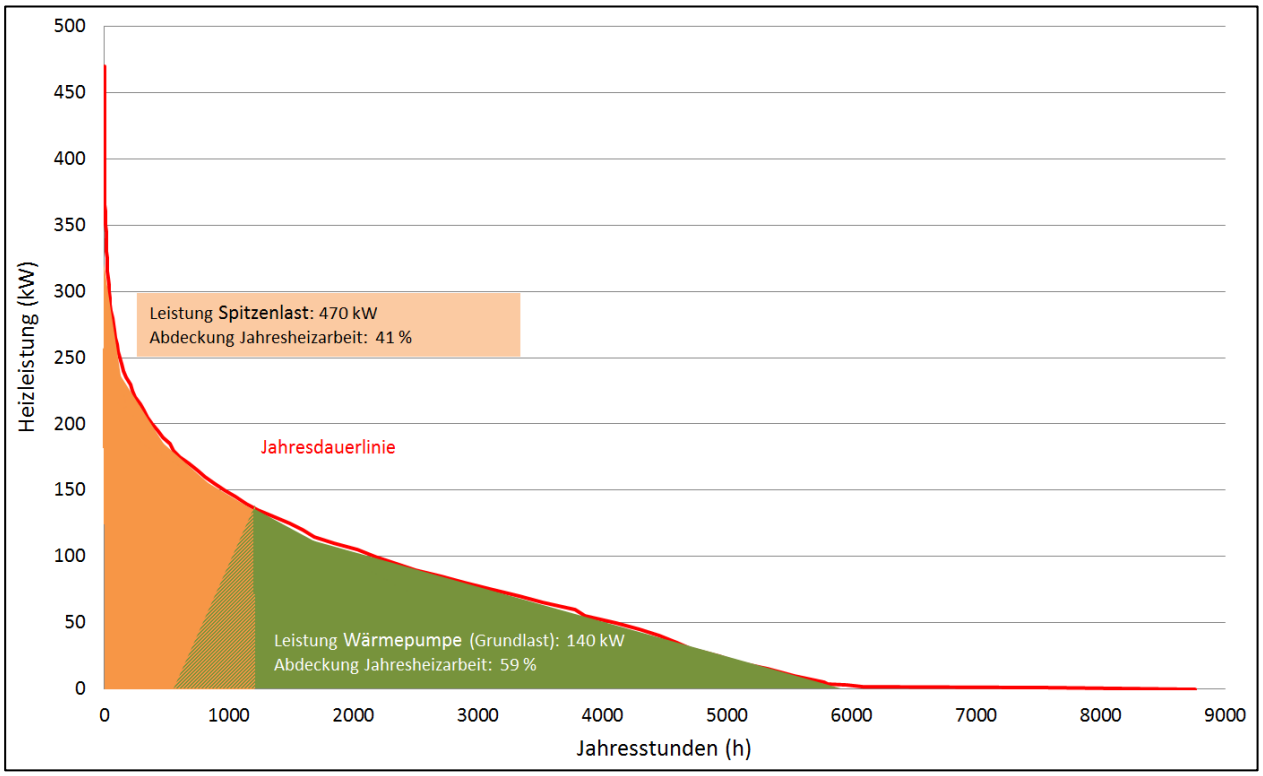



**Abbildung 11: Jahresdauerlinie mit Darstellung der Lastabdeckung (Betrieb A, bivalent alternativer Betrieb)**

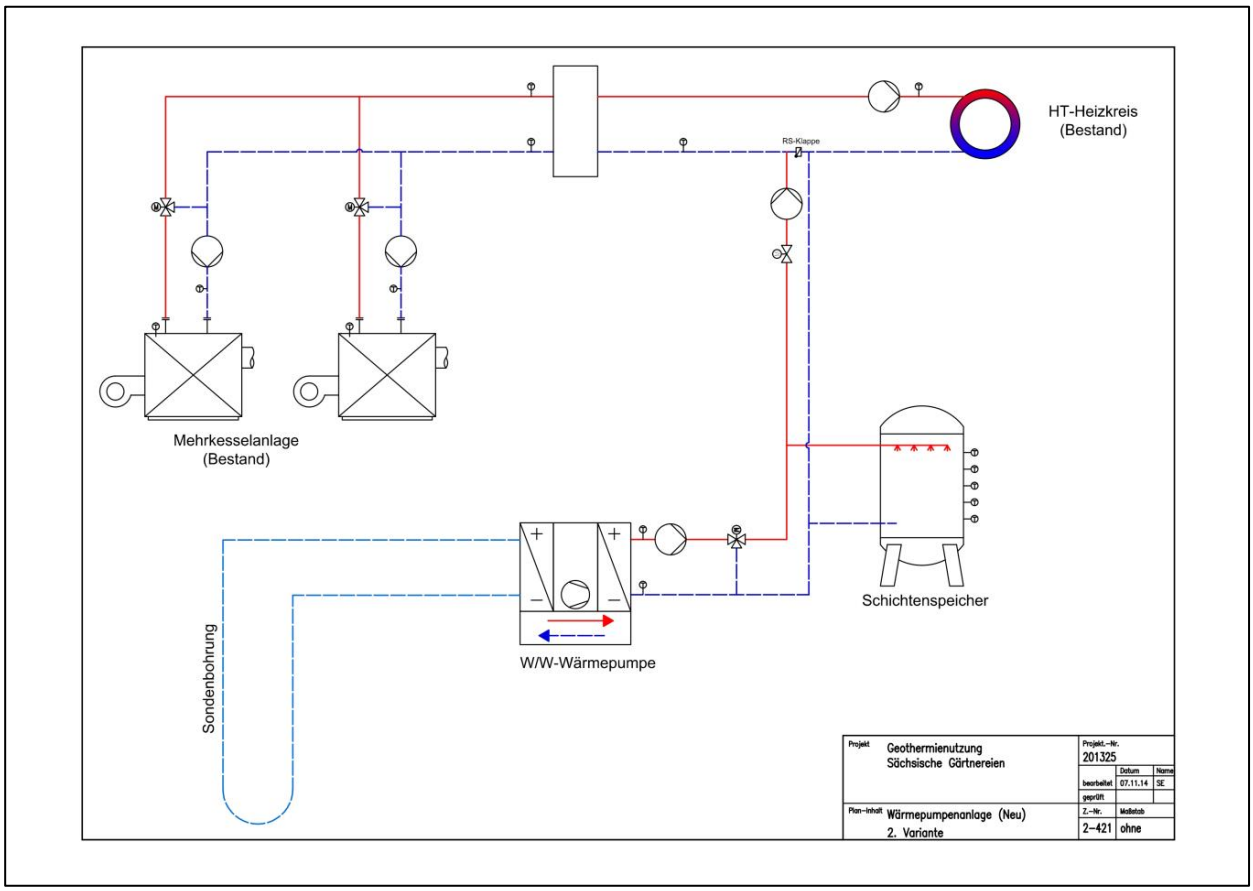



**Abbildung 12: Heizungsschema (bivalent alternativ) für Integrierung einer Wärmepumpe in bestehendes Heizungssystem – Modellbetrieb A**

Wie bereits beim bivalent parallelen Betrieb sind auch für die alternative Betriebsweise verschiedener konventionelle Wärmeversorgungssysteme neben dem Wärmepumpenbetrieb untersucht worden (siehe Tabelle 11 und Tabelle 12).

**Tabelle 11: Untersuchte Wärmeversorgungskonzepte für den Modellbetrieb A bei bivalent alternativem Betrieb**

| Variante | Leistungsaufteilung | | Wärmebedarfsdeckung | |
|---|---|---|---|---|
| | Grundlast (%) | Spitzenlast (%) | Grundlast (%) | Spitzenlast (%) |
| Heizöl | 100 | 0 | 100 | 0 |
| Erdgas | 100 | 0 | 100 | 0 |
| Steinkohle + Heizöl | 30 | 70 | 90 | 10 |
| Pellets + Heizöl | 30 | 70 | 90 | 10 |
| Elektro-Wärmepumpe + Heizöl | 30 | 100 | 60 | 40 |
| Elektro-Wärmepumpe + Erdgas | 30 | 100 | 60 | 40 |

**Tabelle 12: Kesseldimensionierung für den Modellbetrieb A beim bivalent alternativen Betrieb**

| Variante | Leistungsaufteilung | |
|---|---|---|
| | Grundlast (kW) | Spitzenlast (kW) |
| Heizöl | 280 | 280 |
| Erdgas | 280 | 280 |
| Steinkohle + Heizöl | 140 | 360 |
| Pellets + Heizöl | 140 | 360 |
| Elektro-Wärmepumpe + Heizöl | 140 | 500 |
| Elektro-Wärmepumpe + Erdgas | 140 | 500 |

Die **$CO_2$-Bilanz** für die betrachteten Wärmeversorgungskonzepte ist in Tabelle 13 und in Abbildung 10 zusammengefasst.

Wie zu erkennen ist, liegt der $CO_2$-Ausstoß der geothermischen Nutzungskonzepte auch für den bivalent alternativen Betrieb erwartungsgemäß durchweg deutlich unter dem bei ausschließlicher Nutzung fossiler Energieträger. Lediglich die Kombination aus Pellets und fossilen Energieträgern (Heizöl) ist hinsichtlich des $CO_2$-Ausstoßes noch günstiger. Gesamtheitlich betrachtet fällt die $CO_2$-Einsparung der geothermischen Nutzungsvarianten gegenüber den konventionellen Systemen jedoch nicht so deutlich aus, weil der fossile Anteil am bivalenten Betrieb doch vergleichsweise hoch ist.

**Tabelle 13: Wärmebedarf und $CO_2$-Emissionen beim bivalent alternativen Betrieb – Modellbetrieb A**

| Energieträger | $CO_2$-Äquivalent inkl. Vorketten nach GEMIS 4.8, in kg pro kWh |
|---|---|
| Heizöl | 0,302 |
| Erdgas | 0,224 |
| Steinkohle | 0,438 |
| Pellets | 0,041 |
| Deutscher Strommix | 0,633 |
| Ökostrom | 0,04 |

| Energievarianten | Energieverbrauch | Stromverbrauch, in kWh | $CO_2$-Ausstoß, in t pro a (Ökostromnutzung) | $CO_2$-Ausstoß, in t pro a (Nutzung Deutscher Strommix) |
|---|---|---|---|---|
| Heizöl | 58.552 l/a | 11.191 | 178 | 185 |
| Erdgas | 62.004 m³/a | 11.191 | 144 | 151 |
| Steinkohle + Heizöl | 64.884 kg/a + 6.605 l/a | 23.172 | 272 | 286 |
| Pellets + Heizöl | 116.131 kg/a + 6.605 l/a | 23.385 | 45 | 59 |
| Elektro-Wärmepumpe (JAZ 3,8) + Erdgas | 25.612 m³/a | 100.556 | 63 | 123 |
| Elektro-Wärmepumpe (JAZ 3,8) + Heizöl | 24.186 l/a | 100.556 | 77 | 137 |

Neben dem eigentlichen Energiebedarf für die Gewächshaustemperierung müssen für beide Varianten (bivalent alternativ und parallel) auch die Anteile der Zusatzenergie für die Energiebereitstellung und -ausbringung ausgewiesen werden. Die Berechnung der Zusatzenergie erfolgt gemäß eines prozentualen Ansatzes des Gesamtenergiebedarfs (Tabelle 14).

**Tabelle 14: Berechnung der Zusatzenergie für Energiebereitstellung und -ausbringung beim bivalent parallelen und bivalent alternativen Betrieb (% vom Gesamtenergiebedarf)**

| - | Zusatzenergie Bereitstellung | Zusatzenergie Ausbringung |
|---|---|---|
| **Heizölkessel** | 1% | 1% |
| **Erdgaskessel** | 1% | 1% |
| **Steinkohlekessel** | 3% | 1% |
| **Pellet-Kessel** | 3% | 1% |
| **Elektro-Wärmepumpe** | - | 1% |

# 5.2 Auslegung der geothermischen Systeme

## 5.2.1 Modellregion X (Raum Dresden)

### 5.2.1.1 Überblick der untersuchten Wärmequellensysteme

In der Region X sind für den Modellbetrieb A (in den Variante I – bivalent parallel und II – bivalent alternativ) alle drei geothermischen Entzugsverfahren untersucht worden:

- Oberflächennahe Erdwärmesonden
- Mitteltiefe Erdwärmesonden
- Brunnenanlage (offenes System)

Es erfolgten somit sechs numerische 3D-Modellierungen der erforderlichen Wärmequellenanlagen. Die Ergebnisse sind grafisch nur für die Variante I (bivalent paralleler Betrieb) im Textteil dargestellt. Für die Variante II werden die Abbildungen zu den Modellergebnissen überwiegend im Anlagenband (4.1.1) aufgeführt.

### 5.2.1.2 Ergebnisse Variante I – bivalent paralleler Betrieb

#### Oberflächennahe Erdwärmesonden

Die generellen Randbedingungen für die Dimensionierungsrechnungen zur Auslegung der oberflächennahen Erdwärmsonden wurden bereits im Kapitel 4.1 dargestellt.

Im Ergebnis mehrerer Iterationsrechnungen erwies sich eine oberflächennahe Erdwärmesondenanlage, bestehend aus **27 Erdwärmesonden zu je 130 m Endteufe (3.510 Bohrmeter)** als ausreichend zur Abdeckung der geforderten Lasten. Die räumliche Anordnung der Sonden im Betriebsgelände enthält die Abbildung 13.

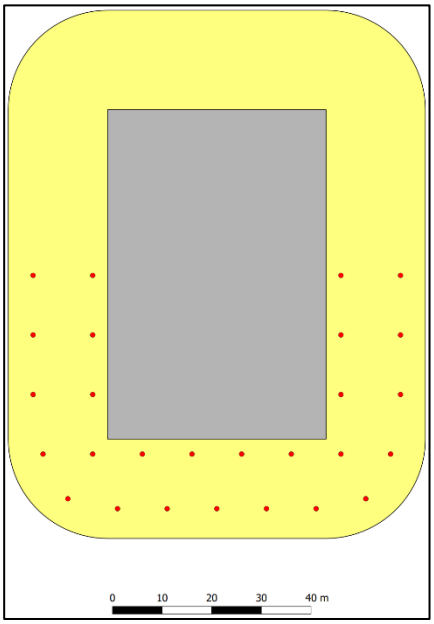



**Abbildung 13: Modellbetrieb A, Standort X, bivalent paralleler Betrieb – Anordnung der oberflächennahen Erdwärmesonden**

Nach einer Simulationszeit von 25 Jahren werden mittlere Fluidtemperaturen von 1 °C berechnet. Die räumliche Ausbreitung der Temperaturfront ist in der Abbildung 14 dargestellt, der zeitliche Verlauf der Fluidtempe-

raturen in der Abbildung 15. Die räumliche Ausbreitung der Temperaturfront ist für den Bereich des GWL dargestellt. Für den Festgesteinsbereich existiert keine so deutliche Abkühlungsfahne aufgrund des fehlenden Grundwasserflusses. Für die Darstellung der Abbildung 15 wurden aus den insgesamt 27 Erdwärmesonden die kältesten und die wärmsten ausgewählt. Dies gilt generell für alle Variantenbetrachtungen.

Aus den Darstellungen wird deutlich, dass die Erdwärmesondenanlage nachhaltig funktionssicher ausgelegt ist.

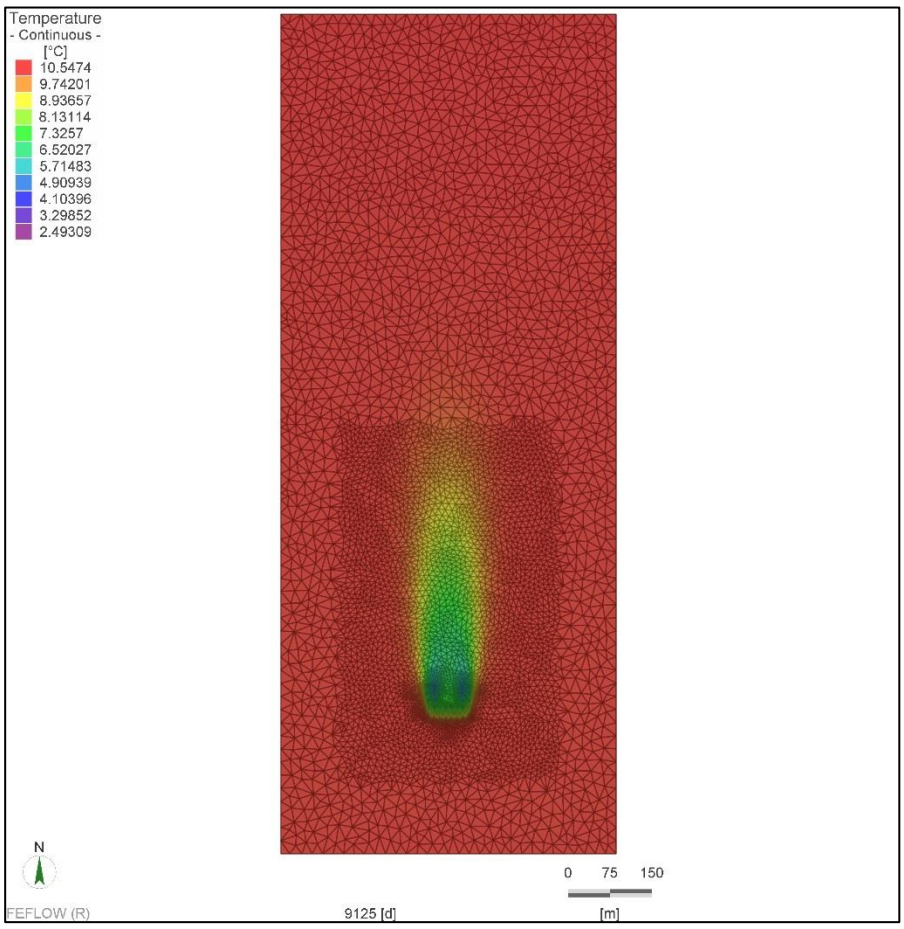



**Abbildung 14: Modellbetrieb A, Standort X, bivalent paralleler Betrieb – Temperaturverhältnisse im GWL nach 25 Jahren (oberflächennahe Erdwärmesonden)**

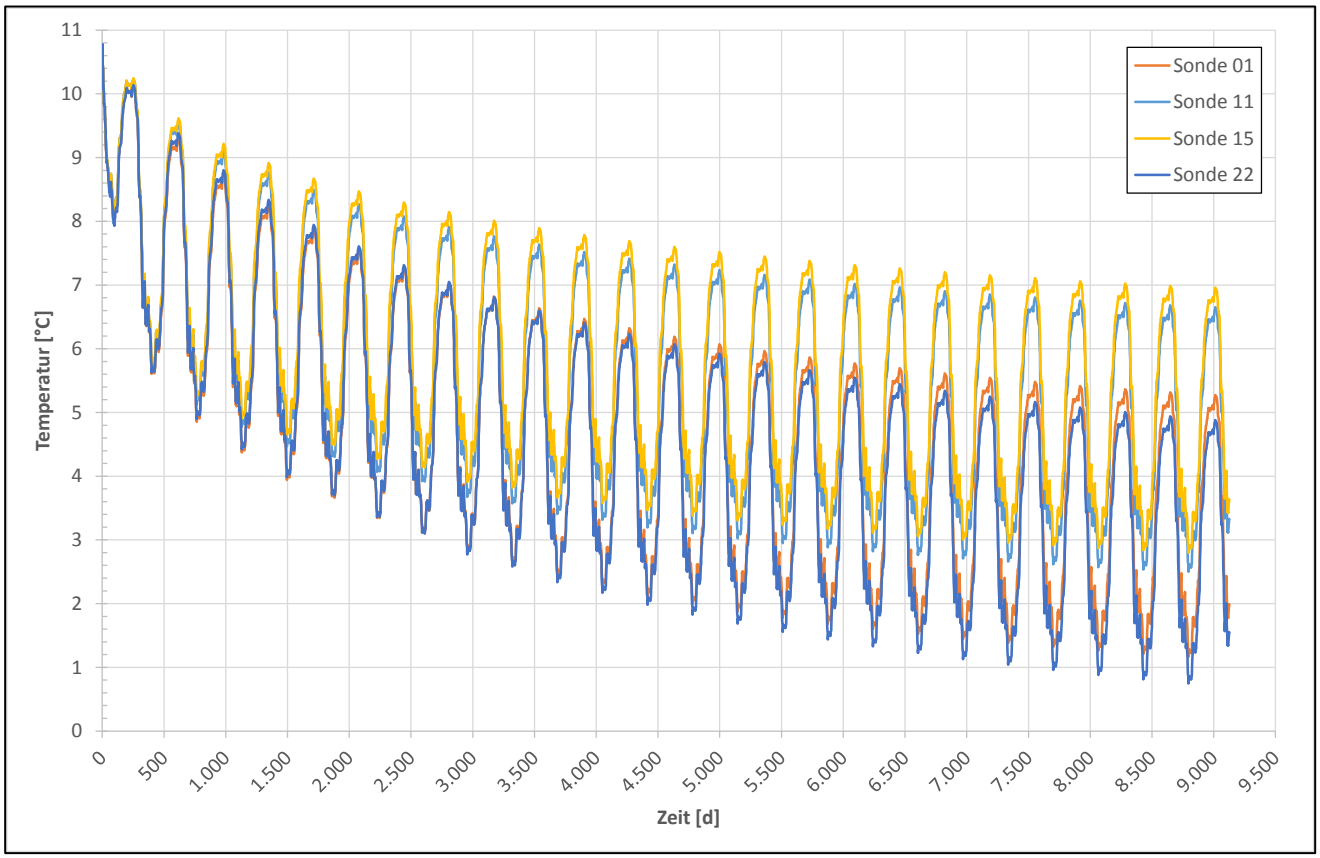



**Abbildung 15: Modellbetrieb A, Standort X, bivalent paralleler Betrieb – Entwicklung der Fluidtemperaturen in 25 Jahren (oberflächennahe Erdwärmesonden)**

Unter Bezugnahme auf die erbrachte Jahresheizarbeit und Heizleistung ergibt sich eine Betriebsstundenzahl von 3.360. Die langjährig mittlere Entzugsleistung liegt im Ergebnis der Auslegung der Wärmequelle bei ca. 29,4 W/m.

Generell ist die jeweils angegebene Entzugsleistung (in W/m) als „Hilfsgröße“ zu betrachten, die nur auf die konkrete energetische, räumliche und material-/bohrtechnische Anlagenkonfiguration bezogen ist. Es handelt sich nicht um eine definierte physikalische Größe, sondern um einen langjährigen Mittelwert der erreichbaren Leistung zum Betrieb der konkreten Wärmepumpe/Erdwärmeanlage mit ihrer jeweiligen anlagentechnischen Spezifik. Die Ausweisung der jeweiligen Entzugsleistung (in W/m) wird trotz der Spezifizierung auf eine konkrete Anlagenkonfiguration vorgenommen, weil diese Angabe in der Praxis als „relativer Vergleichs- bzw. Bewertungsmaßstab“ sehr weit verbreitet ist und daher auch hier mit aufgeführt werden soll.

### Mitteltiefe Erdwärmesonden

Analog zu den oberflächennahen Erdwärmsonden sind die generellen Randbedingungen zur Berechnung der mitteltiefen Erdwärmesonden bereits im Kapitel 4.1 dargestellt.

Bei allen mitteltiefen Sondensystemen sind die Abstände der einzelnen Sonden im Vergleich mit den oberflächennahen Sonden deutlich vergrößert worden. So sind mehrheitlich Sondenabstände von 20 m und mehr berücksichtigt worden, um zum einen eine möglichst geringe gegenseitige Beeinflussung der Sonden (bei vertretbarem Aufwand für die horizontale Anbindung) zu erreichen, zum anderen aber auch das (zwar geringe, jedoch vorhandene) Risiko des „Anbohrens“ bereits errichteter Sonden so gering wie möglich zu halten.

Im Ergebnis mehrerer Iterationsrechnungen erwies sich eine mitteltiefe Erdwärmesondenanlage, bestehend aus **7 Erdwärmesonden zu je 410 m Endteufe (2.870 Bohrmeter),** als ausreichend zur Abdeckung der geforderten Lasten. Die räumliche Anordnung der Sonden im Betriebsgelände enthält die Abbildung 16.

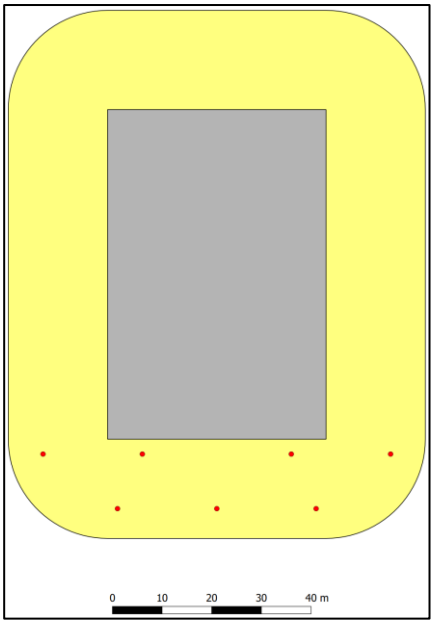



**Abbildung 16: Modellbetrieb A, Standort X, bivalent paralleler Betrieb – Anordnung der mitteltiefen Erdwärmesonden**

Im Vergleich mit den oberflächennahen Erdwärmesonden werden somit 640 Bohrmeter weniger benötigt (entspricht einer Reduzierung um ca. 18 %.

Nach einer Simulationszeit von 25 Jahren werden mittlere Fluidtemperaturen von 0,4 °C berechnet. Die räumliche Ausbreitung der Temperaturfront ist in der Abbildung 17 dargestellt, der zeitliche Verlauf der Fluidtemperaturen in der Abbildung 18.

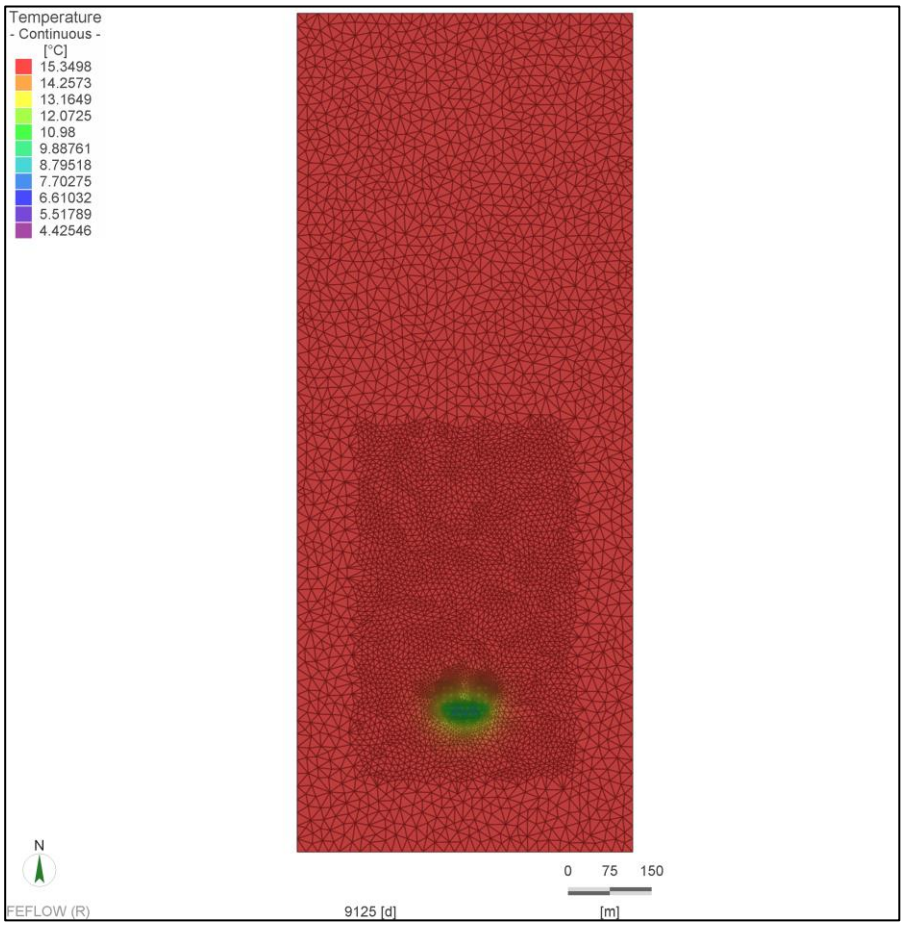



**Abbildung 17: Modellbetrieb A, Standort X, bivalent paralleler Betrieb – Temperaturverhältnisse im GWL nach 25 Jahren (mitteltiefe Erdwärmesonden)**

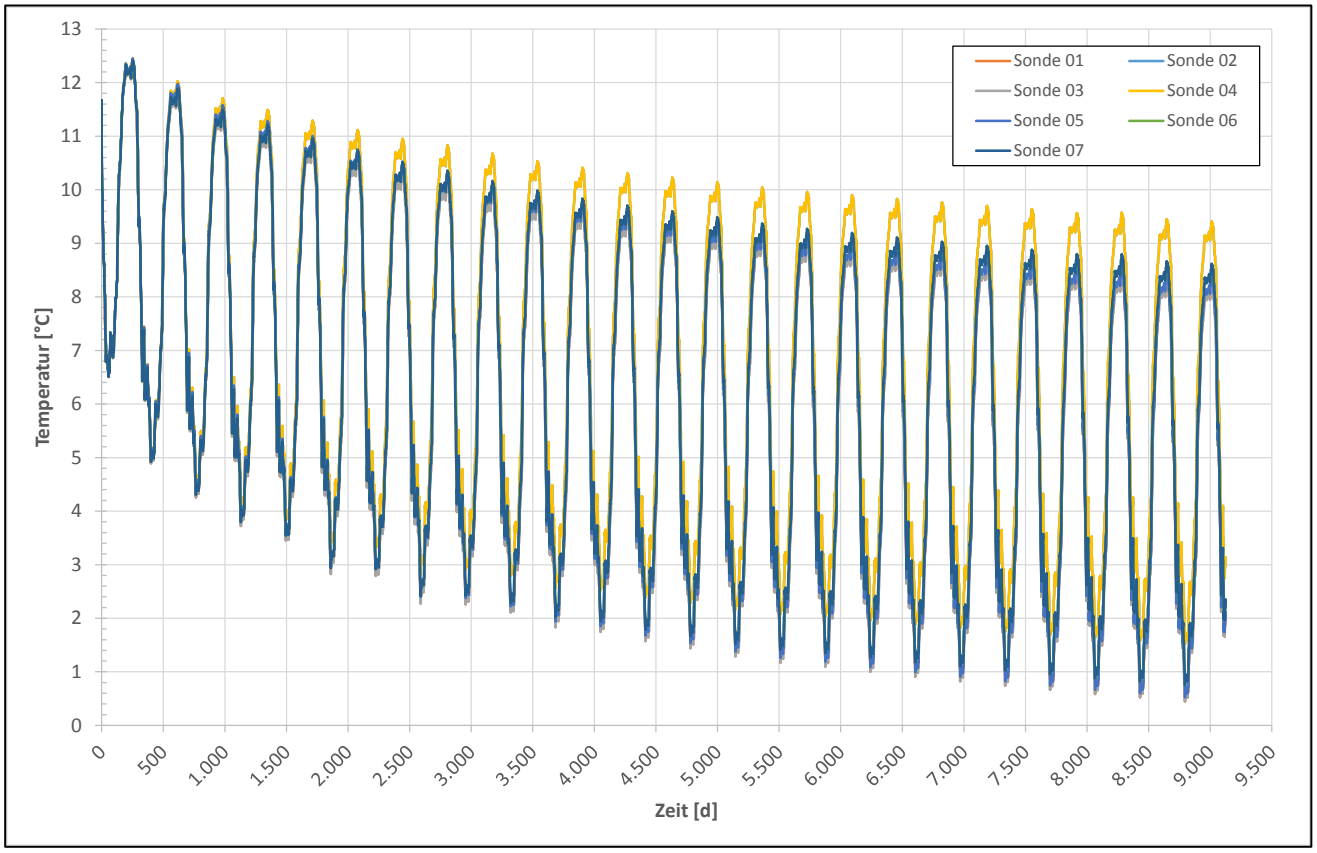



**Abbildung 18: Modellbetrieb A, Standort X, bivalent paralleler Betrieb – Entwicklung der Fluidtemperaturen in 25 Jahren (mitteltiefe Erdwärmesonden)**

Die langjährig mittlere Entzugsleistung liegt im Ergebnis der Auslegung der Wärmequelle bei ca. 35,9 W/m (entspricht etwa einer 18%igen Erhöhung gegenüber den oberflächennahen Erdwärmesonden).

Dies ist darauf zurückzuführen, dass die deutlich tieferen Erdwärmesonden einen höheren Abstand zueinander aufweisen und sich so im Vergleich mit den oberflächennahen Erdwärmesonden etwas weniger gegenseitig beeinflussen. Zudem steht aufgrund der höheren Nutzungstiefen ein höheres Temperaturniveau zur Verfügung.

### Brunnenanlage

Am Standort X wird der von 1,0–20,0 m u. GOK reichende GWL genutzt. Im Ergebnis durchgeführter Recherchen handelsüblicher Wärmepumpen ist für die benötigte Heizleistung von 140 kW ein stündliches Grundwasservolumen zwischen ca. 16 und 25 m³/h erforderlich (bei zulässiger Temperaturspreizung von 6 K).

Das System aus Förder- und Injektionsbrunnen ist daher so zu planen, dass die Bereitstellung dieser Wassermengen nachhaltig ohne weiteres möglich ist. In der Tabelle 15 sind Bohrung und Ausbau der Brunnen in Kurzform zusammengefasst. Die räumliche Darstellung der Brunnen enthält Abbildung 19. Für die genaue Erkundung der Brunnen bzw. deren Ausbaubemessung wurden mindestens zwei Vorbohrungen kalkuliert.

**Tabelle 15: Modellbetrieb A, Region X – Auslegung der Brunnenanlagen (beide Varianten)**

| - | Förderbrunnen | Injektionsbrunnen |
|---|---|---|
| Anzahl (Stück) | 1 | 2 |
| Bohrteufe (m u. GOK) | 21 | 21 |
| Ausbauteufe (m u. GOK) | 20,5 | 20,5 |
| Mindestbohrdurchmesser (mm) | 480 | 420 |
| Ausbaudurchmesser (mm) | 250 | 200 |
| Länge Sumpfrohr Edelstahl V2A (m) | 0,5 | 0,5 |
| Länge Filterrohr Edelstahl V2A (m) | 8,0 | 10,0 |
| Länge Vollrohr Edelstahl V2A (m) | 4,0 | 4,0 |
| Länge Vollrohr PVC (m) | 8,0 | 6,0 |

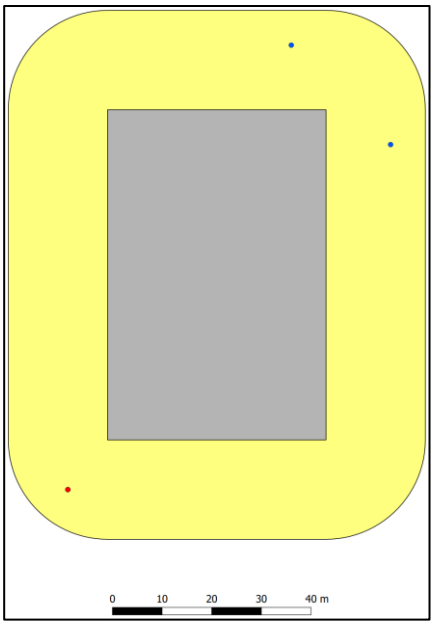



**Abbildung 19: Modellbetrieb A, Standort X, bivalent paralleler Betrieb – Anordnung der Brunnen**

Wie der Abbildung 20 zu entnehmen ist, ist für die vorliegende Modellbetrachtung eine offene Grundwassernutzung gerade noch möglich. Die von den Injektionsbrunnen ausgehende Abkühlungsfront nähert sich nach 25 Jahren zwar bereits sehr deutlich den Förderbrunnen, jedoch ist eine signifikante Beeinflussung nicht vorhanden. Die gewählte Brunnenkonfiguration ist somit ausreichend (hinsichtlich Anzahl, Lage und Ausbau).

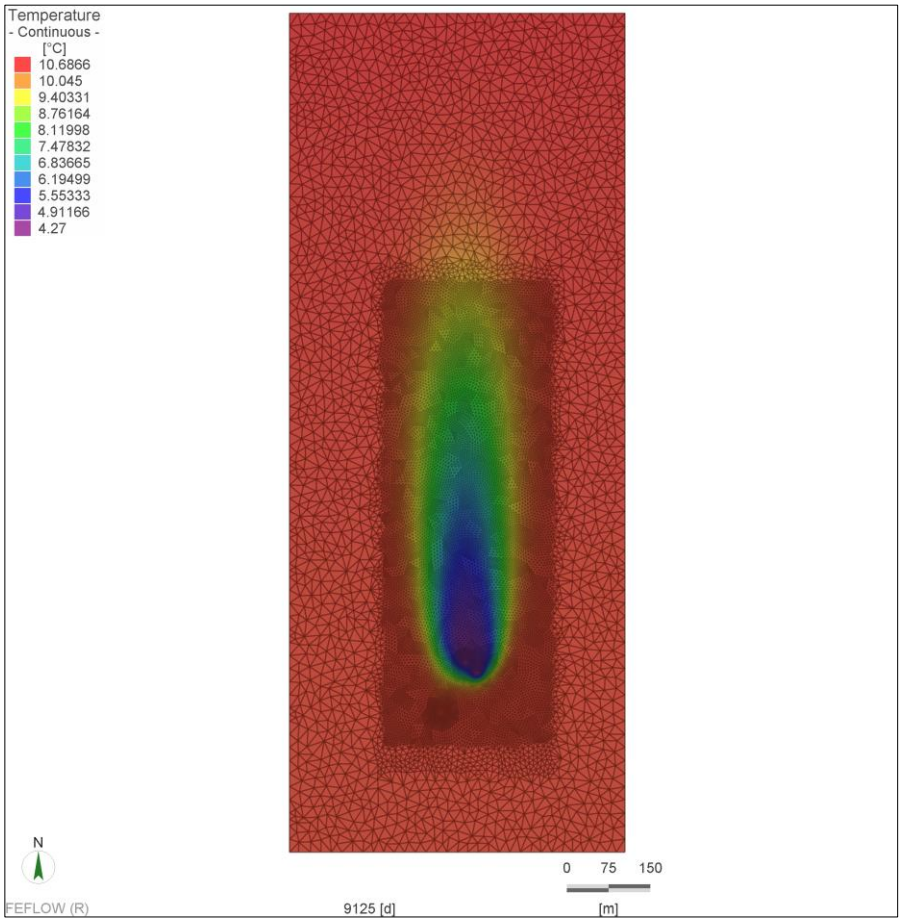



**Abbildung 20: Modellbetrieb A, Standort X, bivalent paralleler Betrieb – Temperaturfronten im Bereich der Brunnenanlage**

Wie bereits in Kapitel 4.1.3 dargestellt, wird noch einmal ausdrücklich darauf hingewiesen, dass hinsichtlich Anzahl und Ausbau der Brunnen höchster Wert auf eine langjährig betriebssichere Funktionsweise der Gesamtanlage gelegt wurde. Die Brunnen sind daher durchweg sehr großzügig und hochwertig konzipiert und erlauben eine bedarfsgerechte, mehrmalige Regenerierung mit **allen** marktüblichen Verfahren.

#### 5.2.1.3 Ergebnisse Variante II – bivalent alternativer Betrieb

**Oberflächennahe Erdwärmesonden**

Im Ergebnis mehrerer Iterationsrechnungen erwies sich eine oberflächennahe Erdwärmesondenanlage, bestehend aus **15 Erdwärmesonden zu je 130 m Endteufe (1.950 Bohrmeter),** als ausreichend zur Abdeckung der geforderten Lasten. Die räumliche Anordnung der Sonden im Betriebsgelände enthält die Abbildung 3 im Anlagenband (4.1.1).

Nach einer Simulationszeit von 25 Jahren werden mittlere Fluidtemperaturen von 0,3 °C berechnet. Die räumliche Ausbreitung der Temperaturfront und der zeitliche Verlauf der Fluidtemperaturen sind in der Abbildung 4bzw. Abbildung 5 im Anlagenband (4.1.1) dargestellt. Aus den Darstellungen wird deutlich, dass die Erdwärmesondenanlage nachhaltig funktionssicher ausgelegt ist.

Unter Bezugnahme auf die erbrachte Jahresheizarbeit und Heizleistung ergibt sich eine Betriebsstundenzahl von 2.223 h. Die langjährig mittlere Entzugsleistung liegt im Ergebnis der Auslegung der Wärmequelle bei ca. 53 W/m.

#### Mitteltiefe Erdwärmesonden

Unter Beachtung einer Wärmequelle aus mitteltiefen Erdwärmesonden zeigte sich im Ergebnis der Modellierungen die Anzahl von **4 Erdwärmesonden zu je 410 m Endteufe (1.640 Bohrmeter)** als ausreichend zur Abdeckung der geforderten Lasten. Die räumliche Anordnung der Sonden im Betriebsgelände enthält der Anlagenband (4.1.1, Abbildung 6). Im Vergleich mit den oberflächennahen Erdwärmesonden werden somit 310 Bohrmeter weniger benötigt (entspricht einer Reduzierung um ca. 16 %).

Nach einer Simulationszeit von 25 Jahren werden mittlere Fluidtemperaturen von 0,4 °C berechnet. Die räumliche Ausbreitung der Temperaturfront und der zeitliche Verlauf der Fluidtemperaturen sind in Abbildung 7 und Abbildung 8 im Anlagenband (4.1.1) dargestellt.

Die langjährig mittlere Entzugsleistung liegt im Ergebnis der Auslegung der Wärmequelle bei ca. 63 W/m (entspricht etwa einer 16%igen Erhöhung gegenüber den oberflächennahen Erdwärmesonden). Auch hier ist die etwas geringere gegenseitige Beeinflussung der mitteltiefen Erdwärmesonden und das höhere Temperaturniveau (aufgrund der höheren Bohrteufe) als Ursache für die höhere Entzugsleistung zu nennen.

#### Brunnenanlage

Für die Betrachtung der bivalent alternativen Betriebsweise werden die identischen Randbedingungen hinsichtlich genutzter GWL und notwendiger Förderleistungen wie bei bivalent parallelem Betrieb angesetzt. Entsprechend ist der auch die Konzeption der Brunnen identisch (siehe Tabelle 15).

Die räumliche Darstellung der Brunnen enthält Abbildung 9 im Anlagenband (4.1.1). Für die genaue Erkundung der Brunnen bzw. deren Ausbaubemessung wurden auch hier mindestens zwei Vorbohrungen kalkuliert.

Wie der Abbildung 10 im Anlagenband (4.1.1) zu entnehmen ist, ist für die vorliegende Modellbetrachtung eine offene Grundwassernutzung möglich. Die von den Injektionsbrunnen ausgehende Abkühlungsfront beeinflusst den Förderbrunnen auch nach 25 Jahren nicht. Die gewählte Brunnenkonfiguration ist somit ausreichend (hinsichtlich Anzahl, Lage und Ausbau). Die vorherige Aufbereitung (Enteisenung, Entmanganung) des Grundwassers ist bei einer offenen Grundwassernutzung am Standort X generell erforderlich um einen **langjährig sicheren Betrieb** zu ermöglichen.

### 5.2.2 Modellregion Y (Raum Leipzig)

#### 5.2.2.1 Überblick der untersuchten Wärmequellensysteme

In der Region Y sind für den Modellbetrieb A (in den Variante I – bivalent parallel und II – bivalent alternativ) alle drei geothermischen Entzugsverfahren untersucht worden:

- Oberflächennahe Erdwärmesonden
- Mitteltiefe Erdwärmesonden
- Brunnenanlage (offenes System)

Es erfolgten somit auch hier sechs numerische 3D-Modellierungen der erforderlichen Wärmequellenanlagen. Die Ergebnisse sind grafisch nur für die Variante I (bivalent paralleler Betrieb) im Textteil dargestellt. Für die Variante II werden die Abbildungen zu den Modellergebnissen überwiegend im Anlagenband (4.1.2) aufgeführt.

#### 5.2.2.2 Ergebnisse Variante I – bivalent paralleler Betrieb

**Oberflächennahe Erdwärmesonden**

Im Ergebnis der erfolgten Berechnungen sind zur Abdeckung der erforderlichen Lasten analog zum Standort **X 27 Erdwärmesonden zu je 130 m Endteufe (3.510 Bohrmeter)** erforderlich. Die räumliche Anordnung der Sonden im Betriebsgelände enthält die Abbildung 21. Im Vergleich mit der Region X ist die Anordnung geothermisch etwas günstiger, bedingt jedoch einen etwas höheren Aufwand bei der horizontalen Anbindung.

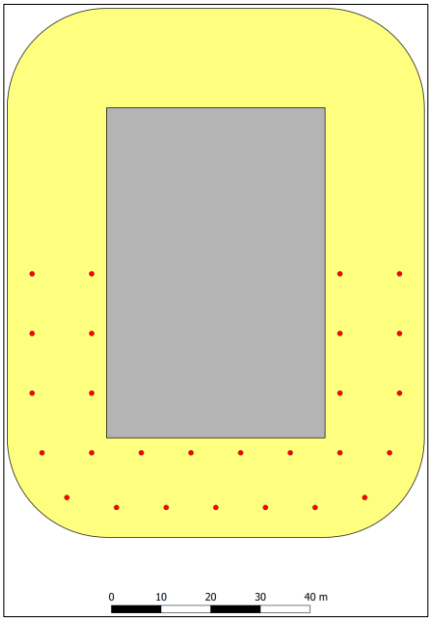



**Abbildung 21: Modellbetrieb A, Standort Y, bivalent paralleler Betrieb – Anordnung der oberflächennahen Erdwärmesonden**

Nach einer Simulationszeit von 25 Jahren werden mittlere Fluidtemperaturen von 0,6 °C berechnet. Die räumliche Ausbreitung der Temperaturfront und der zeitliche Verlauf der Fluidtemperaturen sind in der Abbildung 22 und Abbildung 23 zu sehen. Aus den Darstellungen wird deutlich, dass die Erdwärmesondenanlage nachhaltig funktionssicher ausgelegt ist.

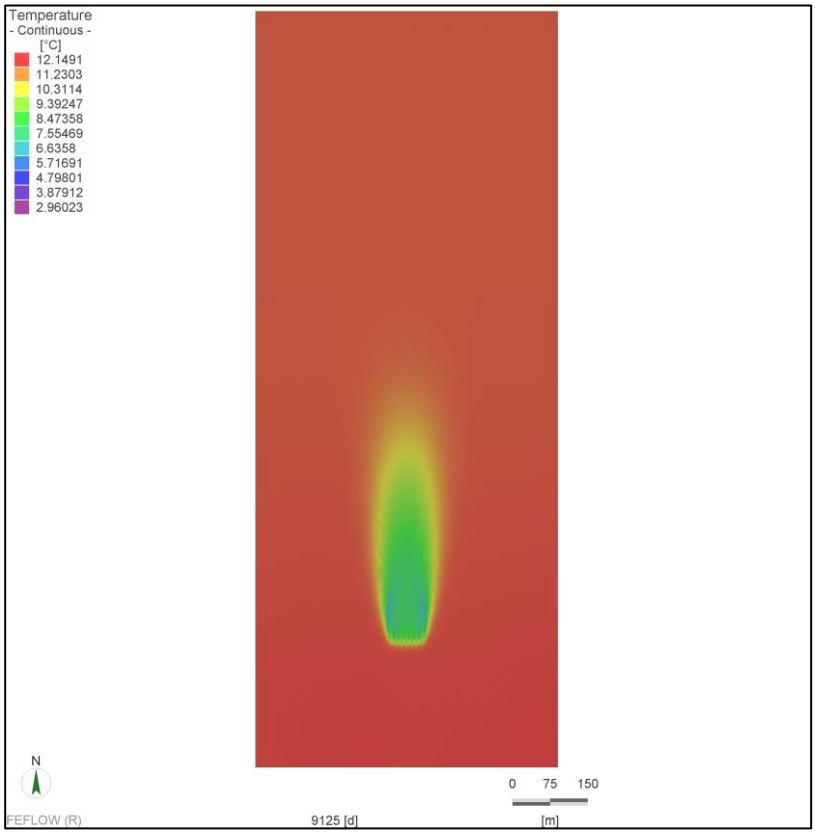



**Abbildung 22: Modellbetrieb A, Standort Y, bivalent paralleler Betrieb – Temperaturverhältnisse im GWL nach 25 Jahren (oberflächennahe Erdwärmesonden)**

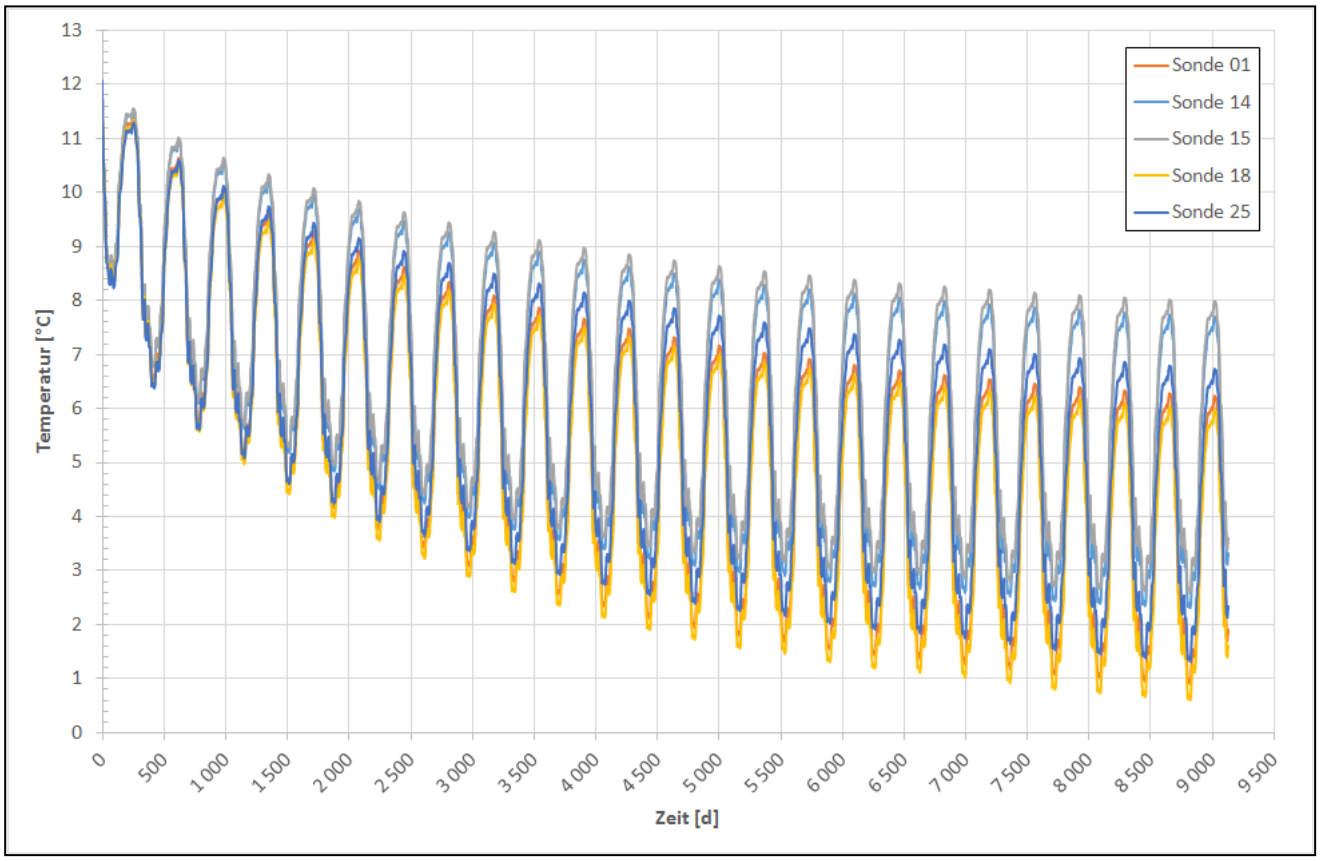



**Abbildung 23: Modellbetrieb A, Standort Y, bivalent paralleler Betrieb – Entwicklung der Fluidtemperaturen in 25 Jahren (oberflächennahe Erdwärmesonden)**

Unter Bezugnahme auf die erbrachte Jahresheizarbeit und Heizleistung ergibt sich eine Betriebsstundenzahl von 3.360. Die langjährig mittlere Entzugsleistung liegt im Ergebnis der Auslegung der Wärmequelle bei ca. 29,4 W/m.

### Mitteltiefe Erdwärmesonden

Im Ergebnis mehrerer Iterationsrechnungen erwies sich eine mitteltiefe Erdwärmesondenanlage, bestehend aus **7 Erdwärmesonden zu je 420 m Endteufe (2.940 Bohrmeter)** als ausreichend zur Abdeckung der geforderten Lasten. Die räumliche Anordnung der Sonden im Betriebsgelände enthält die Abbildung 24.

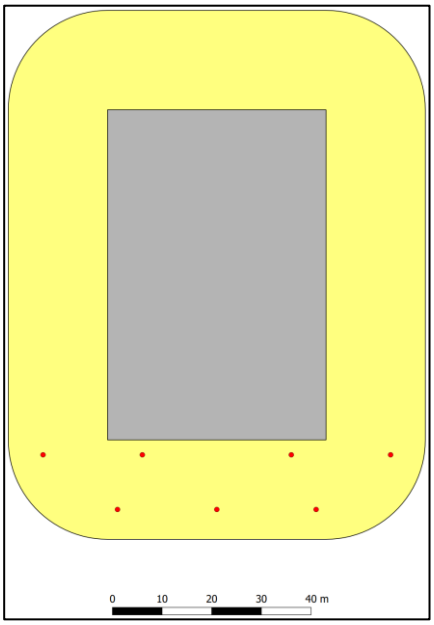



**Abbildung 24: Modellbetrieb A, Standort Y, bivalent paralleler Betrieb – Anordnung der mitteltiefen Erdwärmesonden**

Im Vergleich mit den oberflächennahen Erdwärmesonden werden somit 570 Bohrmeter weniger benötigt (entspricht einer Reduzierung um ca. 16%. Im Vergleich mit dem analogen Modellansatz für den Standort X sind 70 Bohrmeter mehr notwendig.

Nach einer Simulationszeit von 25 Jahren werden mittlere Fluidtemperaturen von 0,2°C berechnet. Die räumliche Ausbreitung der Temperaturfront und der zeitliche Verlauf der Fluidtemperaturen sind in der Abbildung 25 bzw. Abbildung 26 zu sehen.

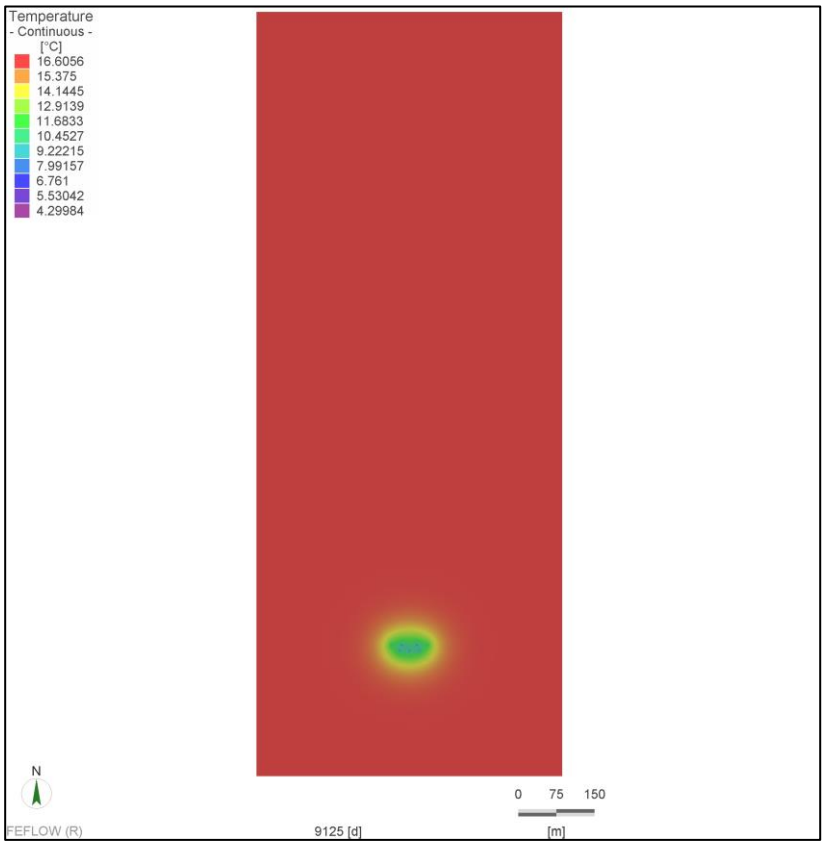



**Abbildung 25: Modellbetrieb A, Standort Y, bivalent paralleler Betrieb – Temperaturverhältnisse im GWL nach 25 Jahren (mitteltiefe Erdwärmesonden)**

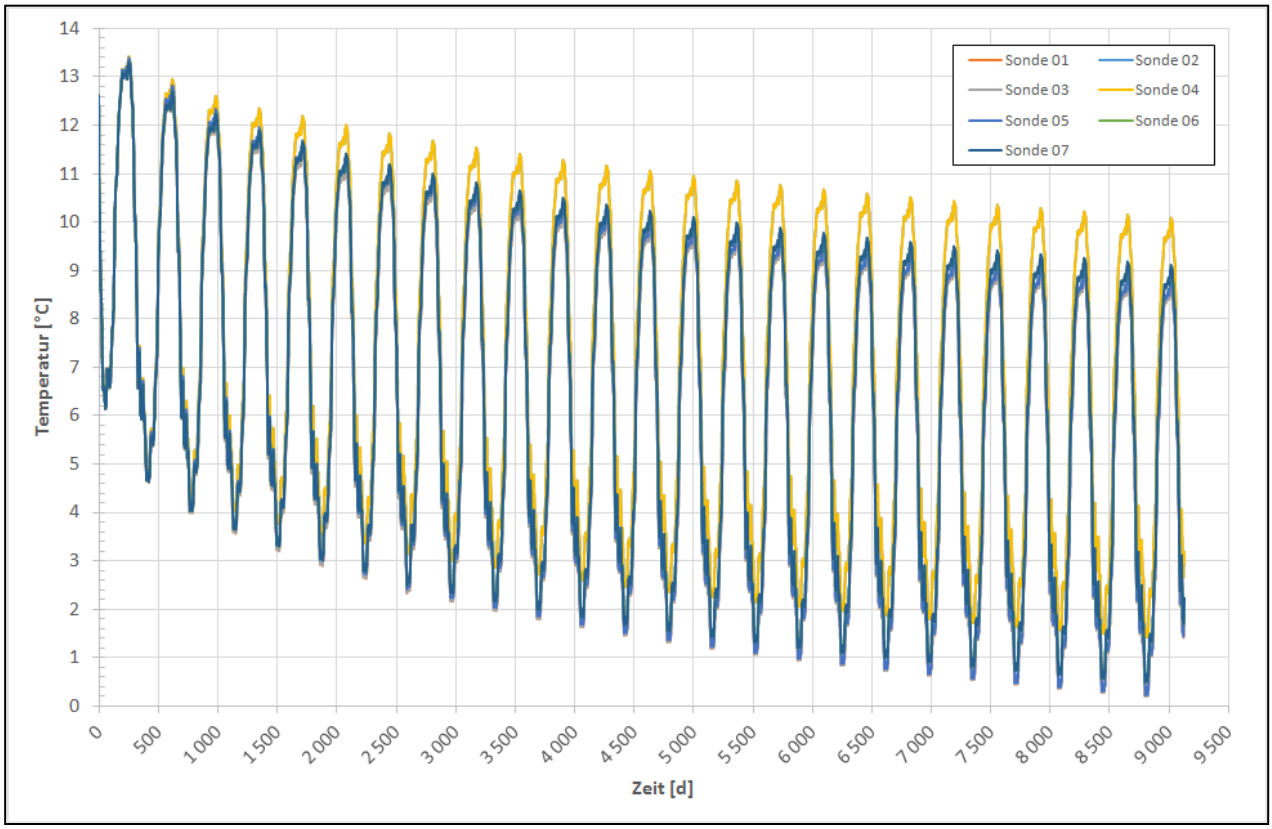



**Abbildung 26: Modellbetrieb A, Standort Y, bivalent paralleler Betrieb – Entwicklung der Fluidtemperaturen in 25 Jahren (mitteltiefe Erdwärmesonden)**

Die langjährig mittlere Entzugsleistung liegt im Ergebnis der Auslegung der Wärmequelle bei ca. 35,1 W/m (entspricht etwa einer 16%igen Erhöhung gegenüber den oberflächennahen Erdwärmesonden). Die Ursache für die etwas höhere Entzugsleistung ist hier analog den mitteltiefen Erdwärmesonden in der Modellregion X (siehe vorhergehendes Kapitel).

### Brunnenanlage

Am Standort Y wird der erste bedeckte GWL von 10,0–25,0 m u. GOK genutzt. Auch hier wird zum Betrieb einer Wärmepumpe mit 140 kW Heizleistung ein stündliches Grundwasservolumen zwischen ca. 16 und 25 m³/h benötigt (bei zulässiger Temperaturspreizung von 6 K).

In der Tabelle 16 sind Bohrung und Ausbau der Brunnen in Kurzform zusammengefasst. Die räumliche Darstellung der Brunnen enthält Abbildung 27. Für die genaue Erkundung der Brunnen bzw. deren Ausbaubemessung wurden mindestens zwei Vorbohrungen kalkuliert.

**Tabelle 16: Modellbetrieb A, Region Y – Auslegung der Brunnenanlagen (beide Varianten)**

| - | Förderbrunnen | Injektionsbrunnen |
|---|---|---|
| Anzahl (Stück) | 1 | 2 |
| | | |
| Bohrteufe (m u. GOK) | 26 | 26 |
| Ausbauteufe (m u. GOK) | 25,5 | 25,5 |
| Mindestbohrdurchmesser (mm) | 480 | 420 |
| Ausbaudurchmesser (mm) | 250 | 200 |
| Länge Sumpfrohr Edelstahl V2A (m) | 0,5 | 0,5 |
| Länge Filterrohr Edelstahl V2A (m) | 8,0 | 10,0 |
| Länge Vollrohr Edelstahl V2A (m) | 4,0 | 4,0 |
| Länge Vollrohr PVC (m) | 13,0 | 11,0 |

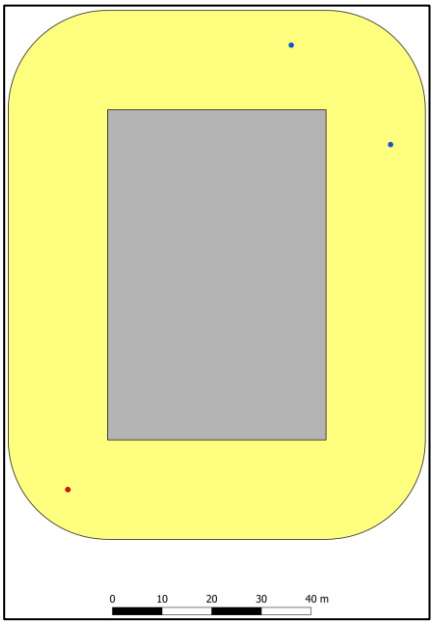



**Abbildung 27: Modellbetrieb A, Standort Y, bivalent paralleler Betrieb – Anordnung der Brunnen**

Wie in der Abbildung 28 sichtbar, ist für die vorliegende Modellbetrachtung eine offene Grundwassernutzung gerade noch möglich. Die von den Injektionsbrunnen ausgehende Abkühlungsfront beeinflusst den Förderbrunnen auch nach 25 Jahren nicht wesentlich, sie hat sich jedoch bereits in unmittelbare Nähe der Brunnen ausgebreitet. Die gewählte Brunnenkonfiguration ist somit noch ausreichend (hinsichtlich Anzahl, Lage und Ausbau).

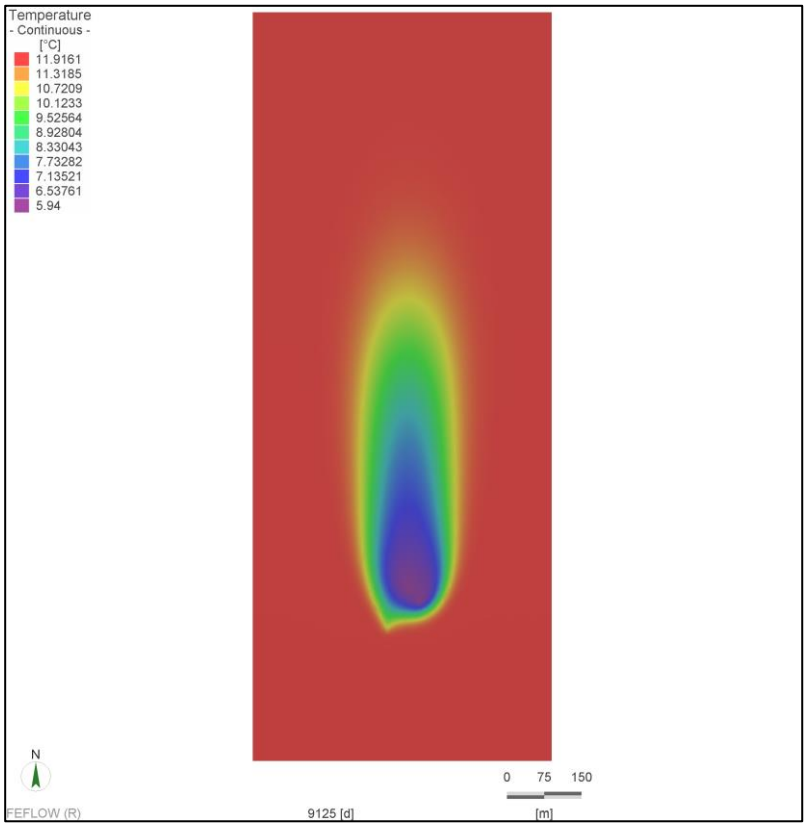



**Abbildung 28: Modellbetrieb A, Standort Y, bivalent paralleler Betrieb – Temperaturfronten im Bereich der Brunnenanlage**

Die vorherige Aufbereitung des Grundwassers ist (wie in Kapitel 4.3 ausführlich erläutert) bei einer offenen Grundwassernutzung am Standort Y generell erforderlich, um einen **langjährig sicheren Betrieb** zu ermöglichenden. Für die Modellregion Y ist also die gleiche Aufbereitungstechnik wie für die Modellregion X notwendig (Enteisenung und Entmanganung). Aufgrund der weit höheren Mineralisation des Grundwassers in der Modellregion Y (vor allem bezüglich der Eisenkonzentrationen) fällt die Aufbereitungsanlage hier jedoch größer aus.

#### 5.2.2.3 Ergebnisse Variante II – bivalent alternativer Betrieb

**Oberflächennahe Erdwärmesonden**

Im Ergebnis der Modellrechnungen erwies sich eine oberflächennahe Erdwärmesondenanlage, bestehend aus **17 Erdwärmesonden zu je 130 m Endteufe (2.210 Bohrmeter),** als ausreichend zur Abdeckung der geforderten Lasten. Die räumliche Anordnung der Sonden im Betriebsgelände enthält die Abbildung 11 im Anlagenband (4.1.2).

Nach einer Simulationszeit von 25 Jahren werden mittlere Fluidtemperaturen von 1 °C berechnet. Die räumliche Ausbreitung der Temperaturfront und der zeitliche Verlauf der Fluidtemperaturen sind in Abbildung 12 und

Abbildung 13 des Anlagenbandes (4.1.2) dargestellt. Aus den Darstellungen wird deutlich, dass die Erdwärmesondenanlage nachhaltig funktionssicher ausgelegt ist.

Unter Bezugnahme auf die erbrachte Jahresheizarbeit und Heizleistung ergibt sich eine Betriebsstundenzahl von 2.223 h. Die langjährig mittlere Entzugsleistung liegt im Ergebnis der Auslegung der Wärmequelle bei ca. 46,7 W/m.

### Mitteltiefe Erdwärmesonden

Unter Beachtung einer Wärmequelle aus mitteltiefen Erdwärmesonden zeigte sich im Ergebnis der Modellierungen die Anzahl von **5 Erdwärmesonden zu je 380 m Endteufe (1.900 Bohrmeter)** als ausreichend zur Abdeckung der geforderten Lasten. Die räumliche Anordnung der Sonden im Betriebsgelände enthält die Abbildung 14 im Anlagenband (4.1.2).

Im Vergleich mit den oberflächennahen Erdwärmesonden werden somit 310 Bohrmeter weniger benötigt (entspricht einer Reduzierung um ca. 14 %. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die deutlich tieferen Erdwärmesonden einen höheren Abstand zueinander aufweisen und sich so im Vergleich mit den oberflächennahen Erdwärmesonden etwas weniger gegenseitig beeinflussen. Zudem steht aufgrund der höheren Nutzungstiefen ein höheres Temperaturniveau zur Verfügung. Aufgrund der höheren Bohrtiefe (im Vergleich mit den oberflächennahen Erdwärmesonden) steigt in der Modellregion Y auch die **mittlere** Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes in dem durch die Erdwärmesonden erschlossenen Teufenbereich. In der Modellregion Y stehen oberhalb des Festgesteins (Grauwacke, Oberkante bei 80 m unter Gelände) eher schlechter wärmeleitfähige Gesteine an, wogegen die Grauwacke selbst eine vergleichsweise hohe Wärmeleitfähigkeit besitzt (siehe Anlagenband [2.2]).

Nach einer Simulationszeit von 25 Jahren werden mittlere Fluidtemperaturen von 0,8 °C berechnet. Die räumliche Ausbreitung der Temperaturfront und der zeitliche Verlauf der Fluidtemperaturen sind in der Abbildung 15 bzw. der Abbildung 16 des Anlagebandes (4.1.2) zu sehen. Die langjährig mittlere Entzugsleistung liegt im Ergebnis der Auslegung der Wärmequelle bei ca. 54,3 W/m (entspricht etwa einer 14%igen Erhöhung gegenüber den oberflächennahen Erdwärmesonden).

### Brunnenanlage

Für die Betrachtung der bivalent alternativen Betriebsweise werden die identischen Randbedingungen hinsichtlich genutzter GWL und notwendiger Förderleistungen wie bei bivalent parallelem Betrieb angesetzt. Entsprechend ist die Brunnenplanung nach Tabelle 16 und Abbildung 27 (bivalent paralleler Betrieb) auch hier zutreffend.

Wie in Abbildung 18 im Anlagenband (4.1.2) dargestellt, ist für die vorliegende Modellbetrachtung eine offene Grundwassernutzung möglich. Die von den Injektionsbrunnen ausgehende Abkühlungsfront beeinflusst den Förderbrunnen auch nach 25 Jahren nicht. Die gewählte Brunnenkonfiguration ist somit ausreichend (hinsichtlich Anzahl, Lage und Ausbau).

### 5.2.3 Modellregion Z (Raum Chemnitz)

#### 5.2.3.1 Überblick der untersuchten Wärmequellensysteme

In der Region Z ist keine Lockergesteinsbedeckung vorhanden. Über dem unverwitterten Festgestein (Phyllit) existieren lediglich eine Zersatzzone und eine lehmig-schluffige bis sandige Hangschuttdecke. Die Grundwasserführung erfolgt allein in der Auflockerungszone über dem festen Phyllit bzw. auf Trennflächen (Kluft- und Störungszonen). Generell gelten die Phyllite jedoch eher als wenig klüftungsfreundlich.

Vor dem genannten Hintergrund eines fehlenden, durchgehend vorhandenen und permanent ausreichend ergiebigen GWL ist für die Modellregion Z **keine** offene Grundwassernutzung möglich. Es verbleiben somit nur zwei Wärmequellensysteme:

- Oberflächennahe Erdwärmesonden
- Mitteltiefe Erdwärmesonden

Folglich sind für die Modellregion Z vier numerische 3D-Modellierungen der erforderlichen Wärmequellenanlagen erfolgt. Analog den Modellregionen X und Y sind die Ergebnisse grafisch nur für die Variante I (bivalent paralleler Betrieb) im Textteil dargestellt. Für die Variante II werden die Abbildungen zu den Modellergebnissen überwiegend im Anlagenband (4.1.3) aufgeführt.

#### 5.2.3.2 Ergebnisse Variante I – bivalent paralleler Betrieb

**Oberflächennahe Erdwärmesonden**

Im Ergebnis der erfolgten Berechnungen sind zur Abdeckung der erforderlichen Lasten **32 Erdwärmesonden zu je 135 m Endteufe (4.320 Bohrmeter)** erforderlich. Die räumliche Anordnung der Sonden im Betriebsgelände enthält die Abbildung 29. Im Vergleich mit den Regionen X und Y werden insgesamt 810 Bohrmeter mehr benötigt (entspricht einem Plus von etwa 19 %).

Dafür verantwortlich ist im Wesentlichen die geringere Untergrundtemperatur in der Modellregion Z (Abbildung 1). Während beispielsweise in den Modellregionen X bzw. Y in 100 m Tiefe Temperaturen von ca. 11,7 bzw. 12,9 °C herrschen, können in der Modellregion Z nur etwa 10,5 °C ausgehalten werden. Zudem ist die teufenabhängige Temperaturzunahme in der Modellregion Z deutlich geringer als in den beiden anderen Modellregionen (siehe Kapitel 3).

Auch der in der Modellregion Z effektiv nicht signifikante Grundwasserfluss (keine Grundwasserleiter vorhanden) ist als Ursache mit zu nennen.

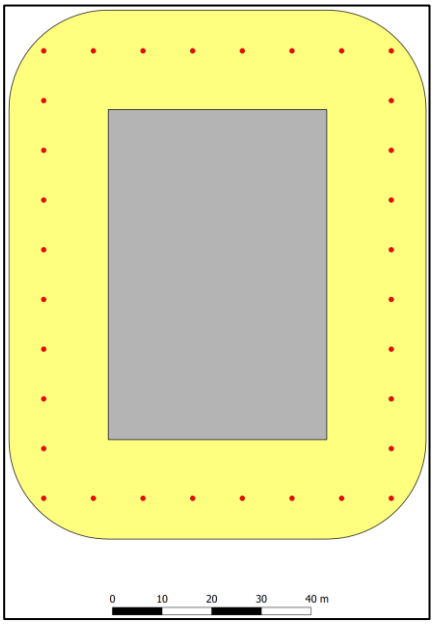



**Abbildung 29: Modellbetrieb A, Standort Z, bivalent paralleler Betrieb – Anordnung der oberflächennahen Erdwärmesonden**

Nach einer Simulationszeit von 25 Jahren werden mittlere Fluidtemperaturen von 0,2 °C berechnet. Die räumliche Ausbreitung der Temperaturfront und der zeitliche Verlauf der Fluidtemperaturen sind in Abbildung 30 und Abbildung 31 zu sehen. Aus den Darstellungen wird deutlich, dass die Erdwärmesondenanlage nachhaltig funktionssicher ausgelegt ist.

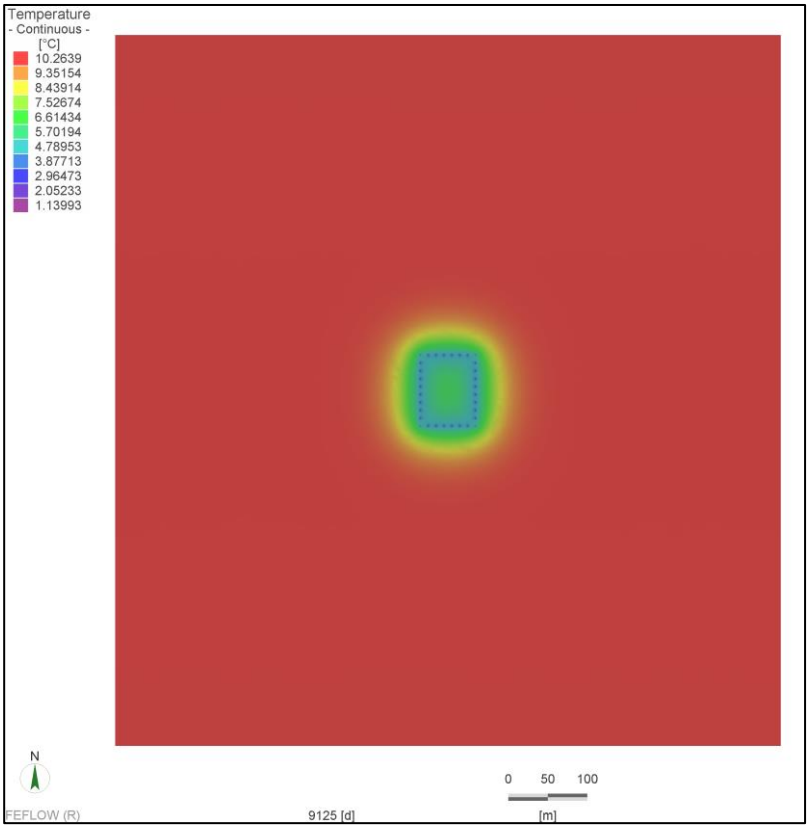



**Abbildung 30: Modellbetrieb A, Standort Z, bivalent paralleler Betrieb – Temperaturverhältnisse im Untergrund nach 25 Jahren (oberflächennahe Erdwärmesonden)**

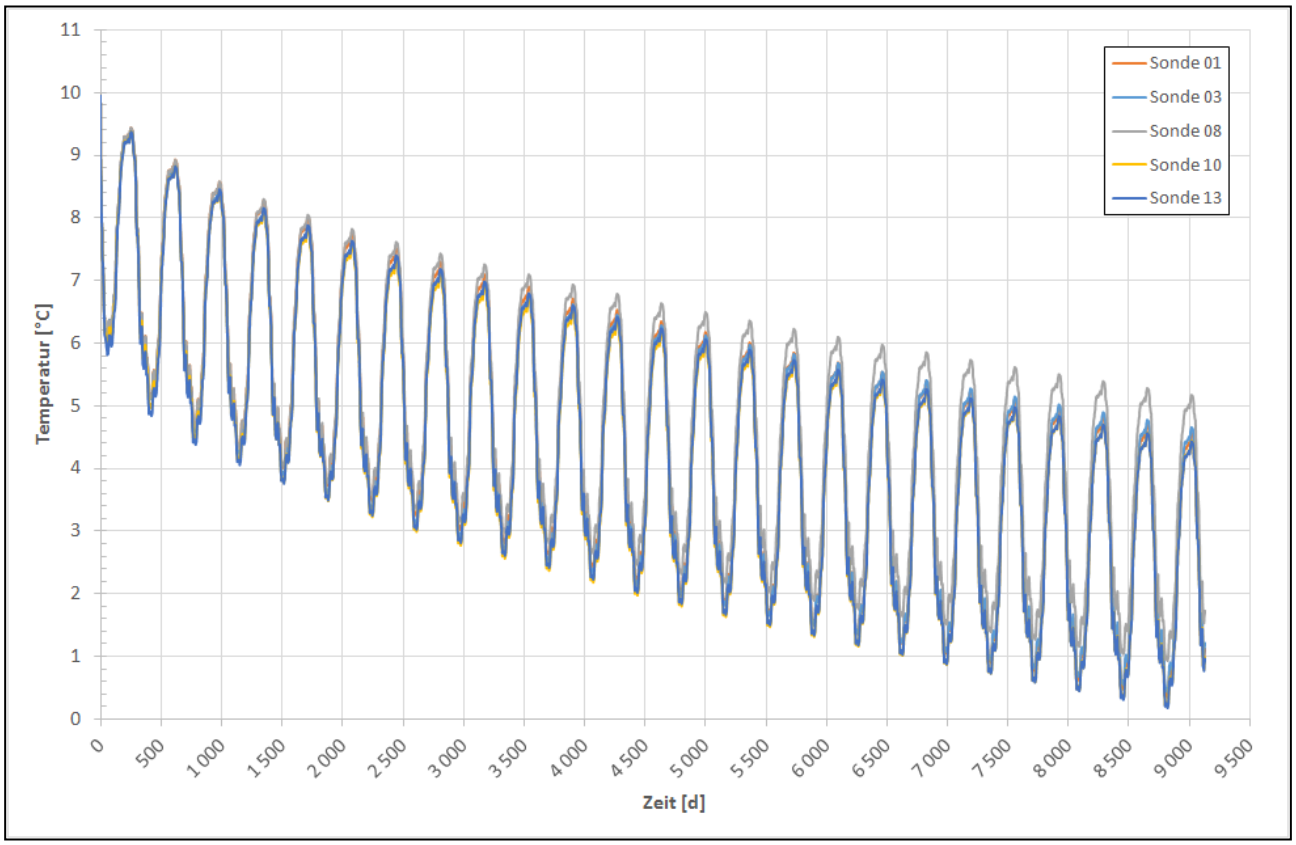



**Abbildung 31: Modellbetrieb A, Standort Z, bivalent paralleler Betrieb – Entwicklung der Fluidtemperaturen in 25 Jahren (oberflächennahe Erdwärmesonden)**

Unter Bezugnahme auf die erbrachte Jahresheizarbeit und Heizleistung ergibt sich eine Betriebsstundenzahl von 3.360. Die langjährig mittlere Entzugsleistung liegt im Ergebnis der Auslegung der Wärmequelle bei ca. 23,9 W/m. Der deutlich geringere Entzug resultiert hier in erster Linie aus dem geringeren, praktisch nicht signifikanten Grundwasserfluss und den geringeren Untergrundtemperaturen.

### Mitteltiefe Erdwärmesonden

Zur Abdeckung der erforderlichen Lasten über mitteltiefe Erdwärmesonden werden insgesamt **10 Erdwärmesonden zu je 370 m Endteufe (3.700 Bohrmeter)** benötigt. Die räumliche Anordnung der Sonden im Betriebsgelände enthält die Abbildung 32.

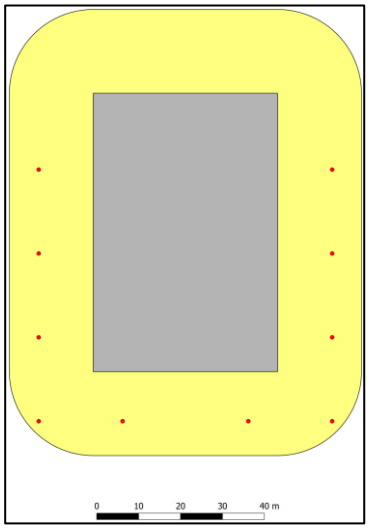



**Abbildung 32: Modellbetrieb A, Standort Z, bivalent paralleler Betrieb – Anordnung der mitteltiefen Erdwärmesonden**

Im Vergleich mit den oberflächennahen Erdwärmesonden werden somit 620 Bohrmeter weniger benötigt (entspricht einer Reduzierung um ca. 14 %. Im Vergleich mit den analogen Modellansätzen für die Standorte X und Y sind 830 bzw. 760 Bohrmeter mehr notwendig. Trotz der höchsten Wärmeleitfähigkeit des Grundgebirges am Standort Z (im Vergleich mit X und Y) überwiegt dort der Effekt der geringsten Untergrundtemperaturen.

Nach einer Simulationszeit von 25 Jahren werden mittlere Fluidtemperaturen von 1,2 °C berechnet. Die räumliche Ausbreitung der Temperaturfront und der zeitliche Verlauf der Fluidtemperaturen sind in Abbildung 33 und Abbildung 34 zu sehen.

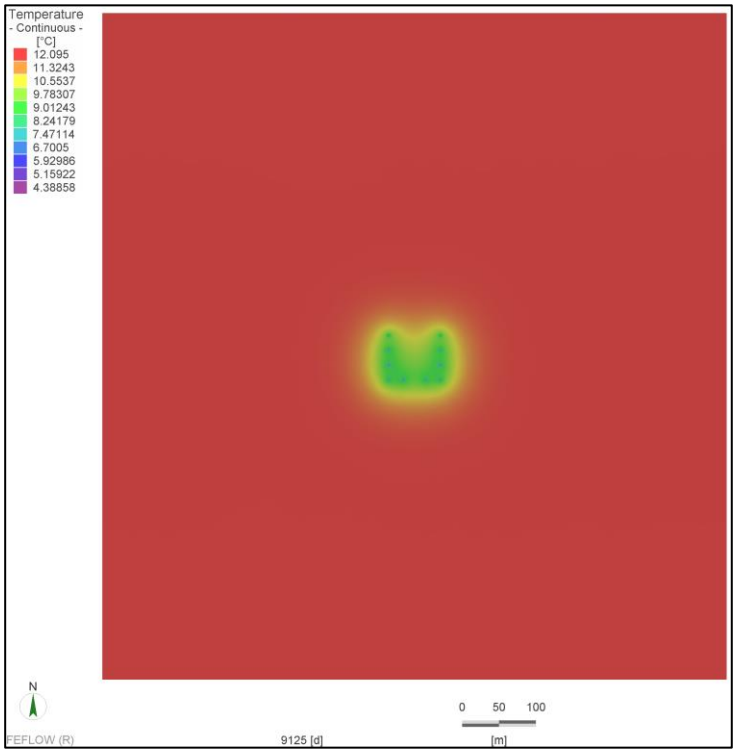



**Abbildung 33: Modellbetrieb A, Standort Z, bivalent paralleler Betrieb – Temperaturverhältnisse im Untergrund nach 25 Jahren (mitteltiefe Erdwärmesoden)**

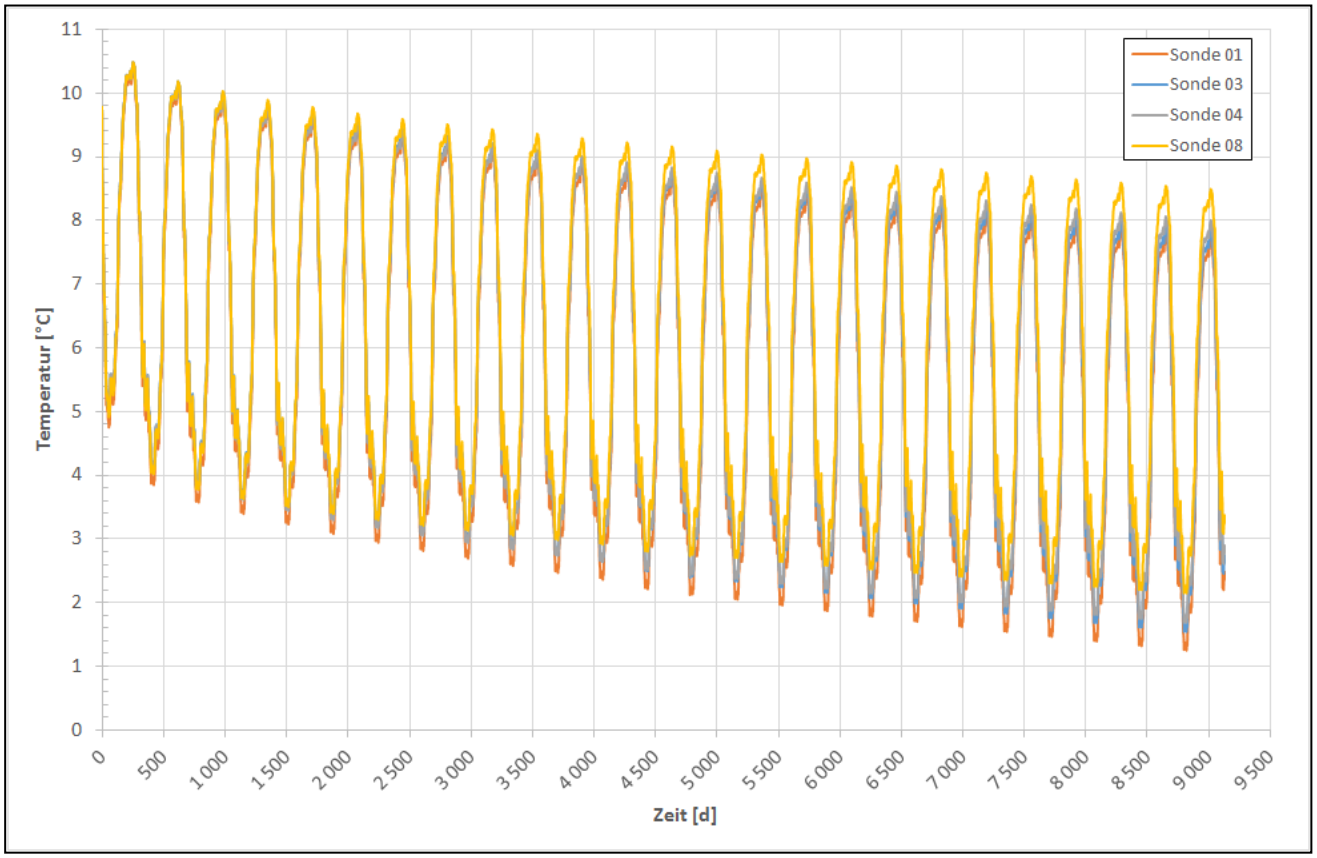



**Abbildung 34: Modellbetrieb A, Standort Z, bivalent paralleler Betrieb – Entwicklung der Fluidtemperaturen in 25 Jahren (mitteltiefe Erdwärmesonden)**

Die langjährig mittlere Entzugsleistung liegt bei ca. 27,9 W/m (entspricht etwa einer 14%igen Erhöhung gegenüber den oberflächennahen Erdwärmesonden).

#### 5.2.3.3 Ergebnisse Variante II – bivalent alternativer Betrieb

**Oberflächennahe Erdwärmesonden**

Im Ergebnis der Modellrechnungen erwies sich eine oberflächennahe Erdwärmesondenanlage, bestehend aus **20 Erdwärmesonden zu je 130 m Endteufe (2.600 Bohrmeter),** als ausreichend zur Abdeckung der geforderten Lasten. Die räumliche Anordnung der Sonden im Betriebsgelände enthält die Abbildung 19 im Anlagenband (4.1.3).

Nach einer Simulationszeit von 25 Jahren werden mittlere Fluidtemperaturen von 0 °C berechnet. Die räumliche Ausbreitung der Temperaturfront und der zeitliche Verlauf der Fluidtemperaturen sind in Abbildung 20 und Abbildung 21 des Anlagenbandes (4.1.3) dargestellt. Aus den Darstellungen wird deutlich, dass die Erdwärmesondenanlage mit einer prognostizierten mittleren Minimaltemperatur des Fluids nach 25 Jahren von 0 °C gerade noch nachhaltig funktionssicher ausgelegt ist.

Unter Bezugnahme auf die erbrachte Jahresheizarbeit und Heizleistung ergibt sich eine Betriebsstundenzahl von 2.223 h. Die langjährig mittlere Entzugsleistung liegt im Ergebnis der Auslegung der Wärmequelle bei ca. 39,7 W/m. Der deutlich höhere Wert gegenüber dem bivalent parallelen Betrieb ergibt sich (wie bei allen anderen Standorten auch) aus der geringeren Betriebsstundenzahl der Wärmepumpe.

Im Vergleich mit den Modellstandorten X und Y ist jedoch auch bei bivalent alternativem Betrieb die höchste Bohrmeterzahl am Standort Z zu verzeichnen. (Zulage von 25 bzw. 15 %). Die Ursache wurde bereits im vorhergehenden Kapitel erläutert.

#### Mitteltiefe Erdwärmesonden

Unter Beachtung einer Wärmequelle aus mitteltiefen Erdwärmesonden zeigte sich im Ergebnis der Modellierungen die Anzahl von **5 Erdwärmesonden zu je 415 m Endteufe (2.075 Bohrmeter)** als ausreichend zur Abdeckung der geforderten Lasten. Die räumliche Anordnung der Sonden im Betriebsgelände enthält die Abbildung 22 im Anlagenband (4.1.3).

Im Vergleich mit den oberflächennahen Erdwärmesonden werden somit 525 Bohrmeter weniger benötigt (entspricht einer Reduzierung um ca. 20 %).

Nach einer Simulationszeit von 25 Jahren werden mittlere Fluidtemperaturen von 0 °C berechnet. Die räumliche Ausbreitung der Temperaturfront und der zeitliche Verlauf der Fluidtemperaturen sind in Abbildung 23 und Abbildung 24 des Anlagenbandes (4.1.3) zu sehen. Die langjährig mittlere Entzugsleistung liegt im Ergebnis der Auslegung der Wärmequelle bei ca. 49,7 W/m (entspricht etwa einer 20%igen Erhöhung gegenüber den oberflächennahen Erdwärmesonden).

## 5.3 Investitionskosten und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

### 5.3.1 Entwicklung der Energiekosten

Eine wichtige Randbedingung für objektive Betrachtungen zur wirtschaftlichen Realisierbarkeit einzelner Nutzungskonzepte stellt die Preisentwicklung einzelner Energieträger dar. In Tabelle 17 werden die Entwicklung der Energiekosten für die letzten 10 Jahre und prognostische Entwicklungsoptionen einer Verteuerung/Verbilligung um je 30 % dargestellt.

**Tabelle 17: Teuerungsraten der Energiepreise und spezifische Energiepreise netto (Stand Juni 2014)**

| Energieträger | Preisanstieg, in %/a | | | Energiepreise netto, in € pro kWh (Stand Juni 2014) |
|---|---|---|---|---|
| | Vergangene 10 Jahre | Abschwächung um 30 % | Anhebung um 30 % | |
| **Heizöl** | 8,34 | 5,84 | 10,84 | **0,0661** |
| **Erdgas** | 4,45 | 3,12 | 5,79 | **0,06389** |
| **Steinkohle** | 2 | 1,4 | 2,6 | **0,02658** |
| **Pellets** | 5,09 | 3,56 | 6,62 | **0,05286** |
| **Strom (Dt. Strommix)** | 5,70 | 3,99 | 7,41 | **0,162** |

### 5.3.2 Investitionskosten

Die Investitionskosten für die Herstellung der Wärmequellenanlagen, der Wärmeverteilnetze und der Wärmepumpentechnik sind nachfolgend für den Modellbetrieb A zusammengestellt. Dabei erfolgt generell eine separate Darstellung funktional abgeschlossener Einheiten (z. B. Wärmequelle, Wärmeverteilnetz).

Die geothermischen Wärmequellensysteme sind im Anlagenband (5.1.1) noch einmal detailliert hinsichtlich ihrer technischen Spezifikation und der jeweiligen Kostenanteile zusammengestellt.

Tabelle 18 stellt die geschätzten Kosten der Wärmeverteilnetze und für die Einbindung der Wärmepumpe dar. Eine Unterscheidung je nach Modellregion ist hier nicht vorhanden, jedoch für die beiden Betriebsvarianten (bivalent parallel und alternativ). Besonders für die parallele Betriebsweise fallen vergleichsweise deutliche Kosten in Höhe von knapp 100.000 Euro an. Unter Beachtung der Betriebsstruktur des Modellbetriebs A und der bereits existierenden Wärmeverteilnetze sind die aufgeführten Maßnahmen für eine geothermische Nutzung jedoch erforderlich, um die technische Nutzbarkeit überhaupt möglich zu machen. Bei Berücksichtigung des bivalent alternativen Betriebs fallen die Kosten mit ca. 25.000 € deutlich geringer aus, weil allein die Einbindung der Wärmepumpentechnik und der Pufferspeicher nebst Zubehör erforderlich sind. Dafür liegt die Lastabdeckung dieser Variante aber nur bei 59 %.

**Tabelle 18: Kostenschätzung Wärmeverteilnetz und Einbindung Wärmepumpe bei unterschiedlichen Betriebsweisen – Modellbetrieb A**

| | **Kosten** | | **Maßnahmen** |
|---|---|---|---|
| | **Variante 1**<br>Bivalent parallele Betriebsweise | **Variante 2**<br>Bivalent alternative Betriebsweise | |
| **Anbindung Wärmepumpe** | | 10.000,00 € | Auftrennen vorhandenes Rohrnetz und Einbindung NT |
| **Pufferspeicher + Zubehör** | 15.000,00 € | 15.000,00 € | |
| **Heizkreise Niedertemperatur (NT) Heizung** | 19.000,00 € | | 4 Mischergruppen einschl. Pumpen, Zubehör und Verteilnetz |
| **Untertischheizung (Gewächshaus 2 bis 4)** | 11.700,00 € | | PE-Rohre unter den Tischen |
| **Alu-Flügelrohr (Gewächshaus 1)** | 30.000,00 € | | 2 Flügelrohre übereinander |
| **Lufterhitzer (Verkauf)** | 20.000,00 € | | 4 Lufterhitzer |
| **Summe Investitionskosten, netto** | 95.700,00 € | 25.000,00 € | |

Die Kosten für die Wärmequellenanlagen sind in der Tabelle 19 (bivalent paralleler Betrieb) und in Tabelle 20 (bivalent alternativer Betrieb) zusammengestellt. Eine detaillierte Untergliederung enthält der Anlagenband (5.1.1).

Wie zu erkennen ist, unterscheiden sich die Investitionskosten zwischen beiden Varianten deutlich. Aufgrund des geringeren Anteils an der Gesamtheizlast im bivalent alternativen Betrieb sind auch die Investitionskosten für diese Variante entsprechend geringer. In den Kosten für die Brunnenanlagen inbegriffen sind neben den technischen Bauwerken der Brunnen auch die komplette Rohwasseraufbereitung und die Wärmepumpe.

**Tabelle 19: Kostenschätzung Wärmepumpenanlage inkl. geothermischer Erschließung bei unterschiedlichen Nutzungsvarianten Modellbetrieb A – bivalent parallele Betriebsweise**

| Geothermische Nutzungsvarianten | Kosten Wärmepumpe inkl. geothermische Erschließung (€, netto) | | |
|---|---|---|---|
| | Standorte | | |
| | Raum Dresden/Meißen | Raum Leipzig | Raum Chemnitz |
| | Leistung Wärmepumpe | | |
| | 140 kW | 140 kW | 140 kW |
| **Oberflächennahe Erdwärmesonden** | 254.138 | 254.138 | 317.775 |
| **Mitteltiefe Erdwärmesonden** | 651.385 | 637.144 | 714.430 |
| **Brunnenanlagen** | 243.012 | 278.851 | Technisch nicht ausführbar |

**Tabelle 20: Kostenschätzung Wärmepumpenanlage inkl. geothermischer Erschließung bei unterschiedlichen Nutzungsvarianten Modellbetrieb A – bivalent alternative Betriebsweise**

| Geothermische Nutzungsvarianten | Kosten Wärmepumpe inkl. geothermische Erschließung (€, netto) | | |
|---|---|---|---|
| | Standorte | | |
| | Raum Dresden/Meißen | Raum Leipzig | Raum Chemnitz |
| | Leistung Wärmepumpe | | |
| | 140 kW | 140 kW | 140 kW |
| **Oberflächennahe Erdwärmesonden** | 152.284 | 166.102 | 200.863 |
| **Mitteltiefe Erdwärmesonden** | 412.788 | 391.825 | 447.601 |
| **Brunnenanlagen** | 195.844 | 219.541 | Technisch nicht ausführbar |

Abschließend sind die gesamten Investitionskosten für den Modellbetrieb A noch einmal in der Tabelle 21 und in Abbildung 35 zusammengestellt.

Eine geothermische Nutzung ist aus rein technischer Sicht fast überall möglich. Allein im Festgesteinsbereich scheidet die offene Grundwassernutzung aus. Die Gesamtkosten schwanken im bivalent parallelen Betrieb etwa zwischen 250.000 und 710.000 €. Die mit Abstand höchsten Kosten fallen durchweg bei den mitteltiefen Erdwärmesonden an. Hier wirken sich vor allem die deutlichen Bohrpreise und die Kosten für das Ausbaumaterial aus. Am günstigsten sind in der Region Leipzig und Chemnitz die oberflächennahen Erdwärmesonden, in der Region Dresden sind die Brunnenanlagen etwas preiswerter.

Im bivalent alternativen Betrieb sind die Investitionskosten entsprechend geringer. Sie liegen zwischen ca. 150.000 und 450.000 €. Die mitteltiefen Erdwärmesonden sind auch hier die jeweils teuerste Variante. Am günstigsten sind jeweils die oberflächennahen Erdwärmesonden.

Grundsätzlich sind in der Kostenschätzung keine Planungskosten der Wärmequellenanlage enthalten (gilt für alle Modellbetriebe). Diese ergeben sich jeweils nach HOAI (aktueller Stand), Teil 3 (Objektplanung), Abschnitt 3 (Ingenieurbauwerke), § 43 (Leistungsbild Ingenieurbauwerke). Je nach konkretem Planungsanspruch sind voraussichtlich die Honorarzonen II bzw. III maßgebend.

Für den Betrieb ist mit einer staatlichen Förderung zu rechnen. Die Beträge dafür sind im nachfolgenden Kapitel aufgeführt. Aus Gründen der Planungssicherheit ist eine Berücksichtigung in Tabelle 21 und Abbildung 35 nicht erfolgt.

**Tabelle 21: Gesamtinvestitionskosten – Modellbetrieb A**

| Investitionskosten, gesamt (netto, in €) | | Geothermische Nutzungsvariante | | |
|---|---|---|---|---|
| | | Oberflächennahe Erdwärmesonden | Mitteltiefe Erdwärmesonden | Brunnenanlagen |
| Region X (Raum Dresden) | parallel | 349.838 | 747.085 | 338.712 |
| | alternativ | 177.284 | 437.788 | 220.844 |
| Region Y (Raum Leipzig) | parallel | 349.838 | 732.844 | 374.551 |
| | alternativ | 191.102 | 416.825 | 244.541 |
| Region Z (Raum Chemnitz) | parallel | 413.475 | 810.130 | -- |
| | alternativ | 225.863 | 472.601 | -- |

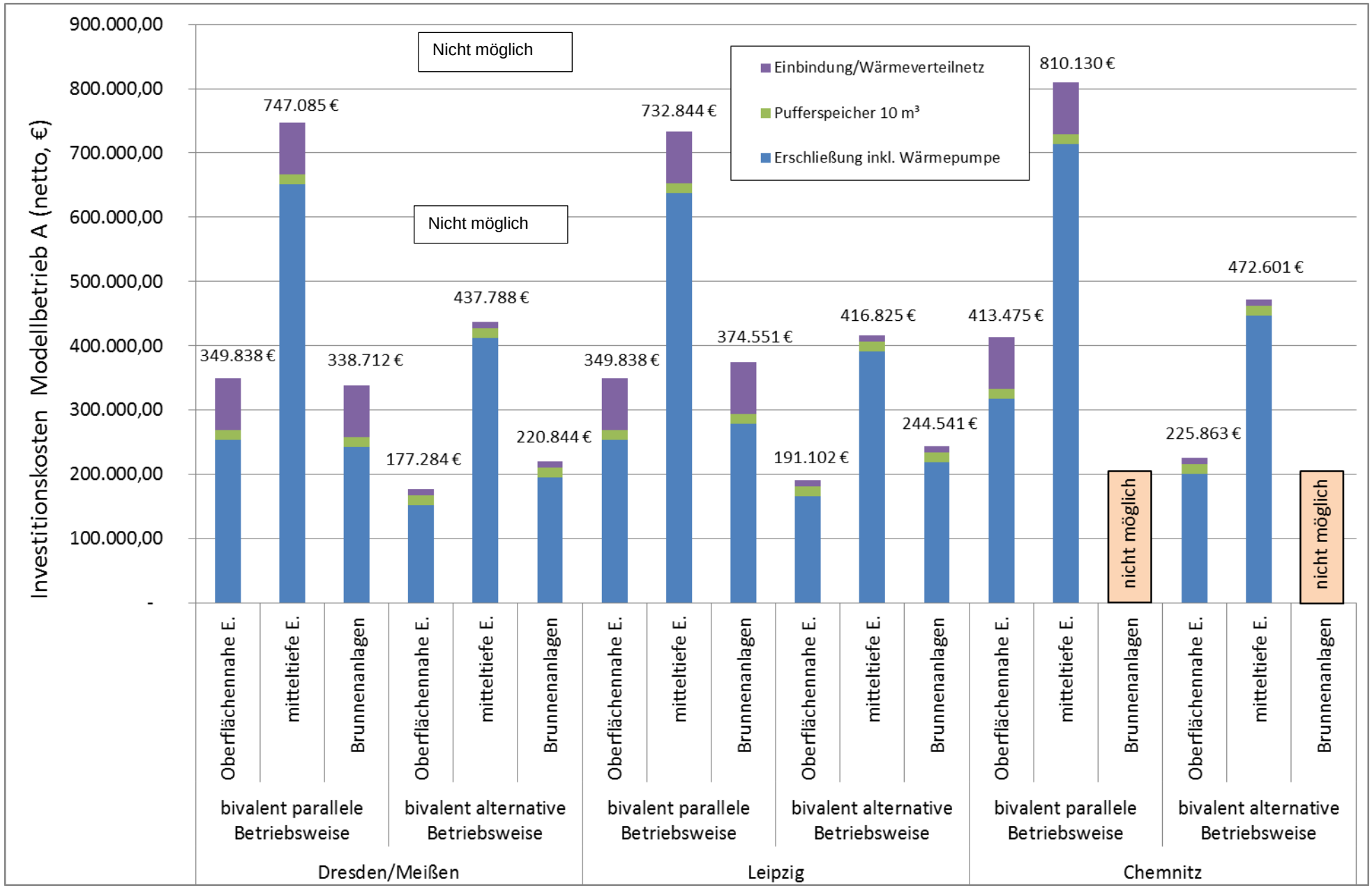



**Abbildung 35: Übersicht der Investitionskosten bei den unterschiedlichen geothermischen Nutzungsvarianten – Modellbetrieb A**

### 5.3.3 Generelle Randbedingungen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen

#### Wärmegestehungskosten

Um die Wirtschaftlichkeit der ausgewählten Wärmeversorgungssysteme der unterschiedlichen Modellbetriebe bewerten zu können, wurden die Wärmegestehungskosten der einzelnen Wärmeversorgungssysteme und deren statische Amortisationszeiten ermittelt. In den aufgeführten Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen wurden alle Kostenkomponenten einer Anlage berücksichtigt, sodass der Einfluss der verschiedenen Kosten untersucht werden konnte. Die VDI-Richtlinie 2067, Blatt 1 (Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen, Grundlagen und Kostenberechnung) beschreibt ein Verfahren zur vergleichenden Berechnung der Kosten von gebäudetechnischen Anlagen, welche für einen objektiven Vergleich verschiedener Versorgungstechniken dient und für die gegenwärtige Wirtschaftlichkeitsbetrachtung herangezogen wurde. Als Kosten werden hierbei die innerhalb eines Jahreszeitraumes anfallenden Ausgaben bezeichnet. Die VDI-Richtlinie teilt die Wärmegestehungskosten in folgende Kostengruppen auf:

- Kapitalgebundene Kosten
- Verbrauchsgebundene Kosten
- Betriebsgebundene Kosten
- Sonstige Kosten

Unter den **kapitalgebundenen Kosten** werden die Ausgaben für Planung, Anschaffung, Instandsetzung und Erneuerungskosten zusammengefasst. Im Falle der unterschiedlichen geothermischen Nutzungsvarianten wären das z. B. Kosten für die geothermische Erschließung (wie Bohrarbeiten, Förder- und Injektionsbrunnen), die Wärmepumpe oder die Kosten für einen Wärmespeicher. Im Falle der aufgeführten Vergleichswärmeerzeugersysteme wurden neben den Kosten für den Wärmeerzeuger selbst Kosten für die Kraftstofflogistik und Bevorratung, Anschluss- und Einbindekosten und ebenfalls Kosten für einen evtl. benötigten Wärmespeicher berücksichtigt. Weil aus Gründen einer effektiven Nutzung von Wärmepumpenanlagen in der gegenwärtigen Studie die Vorlauftemperaturen auf ca. 35–45°C begrenzt wurden, wurden die Wärmeverteilsysteme auf diese Vorlauftemperaturen angepasst (z. B. Lufterhitzer, Alu-Flügelrohre, Fußbodenheizung), sodass demzufolge die Wärmeverteilsysteme je nach Modellbetrieb und Aufgabenstellung in den kapitalgebundenen Kosten berücksichtigt wurden. Die Preise für die bau- und maschinentechnischen Anlagenteile wurden aus Ausschreibungsunterlagen, Kostenberechnungen, Marktübersichten, aktuellen Angeboten und dem KTBL-Arbeitsblatt „Individuelle Kalkulation des Investitionsbedarfs für Gewächshausanlagen“ (2013) entnommen. Die gesamten Anlagenteile der Wärmeerzeugung und -verteilung wurden über eine Nutzungsdauer von 15 Jahren abgeschrieben. Die betrachteten Investitionen wurden vollständig über Fremdkapital finanziert. Es wurde ein Kalkulationszinssatz von 4 % angenommen. Eine jährliche Inflationsrate wurde nicht berücksichtigt. Für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der Modellbetriebe A und B wurden die gesamten Neuinvestitionen für die Wärmeerzeugung (inkl. geothermischer Erschließung) und die Wärmeverteilung berücksichtigt. Für die Modellbetriebe C und D wurde nur die *Differenz* der Investitionsbeträge des jeweiligen konventionellen Systems, z. B. einer Ölkesselanlage und einer Wärmepumpe (inkl. Erschließung) herangezogen und für die Berechnung der kapitalgebundenen Kosten verwendet. Dies ist dadurch zu begründen, dass es sich jeweils um Neubauten handelt und somit kein Bestandssystem vorhanden ist. Relevant ist daher der Differenzbetrag der Investitionskosten zwischen den verschiedenen Systemen.

Die **verbrauchsgebundenen Kosten** stellen die Energiekosten (z. B. Strom, Erdgas, Heizöl, Steinkohle, Pellets) inklusive der Hilfsenergie dar, welche eingesetzt werden müssen, um die erforderliche Wärmemenge zur Verfügung zu stellen. Die Ermittlung des Wärmebedarfs der einzelnen Modellbetriebe erfolgte mit dem Simu-

lationsprogramm HORTEX (Version 4.1). Die für die Wärmebereitstellung benötigte Hilfsenergie wurde bei Kesselanlagen, die mit Heizöl oder Erdgas betrieben werden, mit 1 % und bei Steinkohle- und Pellet-Kesselanlagen mit 3 % vom Jahreswärmeenergieverbrauch angenommen. Die Hilfsenergie, welche für die Wärmeverteilung benötigt wird, beträgt unabhängig vom Energieträger 1 % vom Jahreswärmeenergieverbrauch. Um eine Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Energieträger erreichen zu können, wurden über die Heizwerte bzw. Jahresarbeitszahlen die daraus resultierenden jährlich benötigten Mengen an Brennstoff bzw. Strom in Kilowattstunden errechnet. Die Energiekosten für die konventionellen Energieträger und für Elektroenergie wurden pro Modellbetrieb für drei unterschiedliche Preisentwicklungen ermittelt. Hierbei wurde die Fortsetzung des Preisanstiegs der letzten 10 Jahre und die Zunahme bzw. die Abschwächung des Preisanstiegs um 30 % zugrunde gelegt. Anhand des LEG-Verfahrens (Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Jugend, Familie und Gesundheit 1999) wurden die Mittelwertfaktoren (Abbildung 36) für die Preissteigerungen der verschiedenen Energieträger ermittelt, die den mittleren Energiepreis im Betrachtungszeitraum (hier 15 Jahre) angeben. Somit konnten die Energiekosten bzw. die verbrauchsgebundenen Kosten für die drei vorgegebenen Zukunftsszenarien ermittelt werden.

Berechnung Mittelwertfaktor $m_e$:

$$m_e = \frac{1+s_e}{p-s_e} \cdot \left(1-\left(\frac{1+s_e}{1+p}\right)^n\right) \cdot a_{p,n}$$

$S_e$ jährliche Teuerungsrate der Energie
p Kalkulationszinssatz, in (1/a)
n Länge des Betrachtungszeitraumes
$a_{p,n}$ Annuitätsfaktor zum Kalkulationszins p und zum Betrachtungszeitaum n, in (1/a)

Der anzunehmende Energiepreis errechnet sich dann durch die Multiplikation des aktuellen Energiepreises mit dem berechneten Mittelwertfaktor. Die errechneten Energiepreisanstiege der letzten 10 Jahre für die unterschiedlichen Energieträger wurden in Tabelle 17 zusammengefasst. Die aktuellen Energiepreise (Stand Juni 2014) und die Preisentwicklungen der letzten 10 Jahre (Zeitraum zwischen 2004 und 2013) wurden vom Statistischen Bundesamt (Daten zur Energiepreisentwicklung, Stand Juni 2014), C.A.R.M.E.N. e. V. und der RAG AG bezogen.

| Mittelwertfaktoren für Preissteigerungen $m_e$ und $m_u$, in [-] | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Kapitalzins p = 2 %/a | | | | | | | | | | | |
| Betrachtungszeitraum n, in [a] | Preissteigerung s, in [%/a] | | | | | | | | | | |
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 5 | 1,00 | 1,03 | 1,06 | 1,09 | 1,12 | 1,16 | 1,19 | 1,23 | 1,26 | 1,30 | 1,34 |
| 10 | 1,00 | 1,05 | 1,11 | 1,18 | 1,24 | 1,31 | 1,38 | 1,46 | 1,55 | 1,63 | 1,73 |
| 12 | 1,00 | 1,06 | 1,13 | 1,21 | 1,29 | 1,38 | 1,47 | 1,57 | 1,68 | 1,79 | 1,92 |
| 15 | 1,00 | 1,08 | 1,17 | 1,26 | 1,37 | 1,48 | 1,61 | 1,75 | 1,90 | 2,07 | 2,25 |
| 18 | 1,00 | 1,09 | 1,20 | 1,32 | 1,45 | 1,60 | 1,76 | 1,95 | 2,16 | 2,39 | 2,65 |
| 20 | 1,00 | 1,10 | 1,22 | 1,36 | 1,51 | 1,68 | 1,88 | 2,10 | 2,35 | 2,64 | 2,97 |
| 25 | 1,00 | 1,13 | 1,28 | 1,46 | 1,66 | 1,91 | 2,19 | 2,53 | 2,93 | 3,39 | 3,95 |
| 30 | 1,00 | 1,15 | 1,34 | 1,56 | 1,84 | 2,17 | 2,57 | 3,06 | 3,66 | 4,40 | 5,30 |
| Kapitalzins p = 3 %/a | | | | | | | | | | | |
| Betrachtungszeitraum n, in [a] | Preissteigerung s, in [%/a] | | | | | | | | | | |
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 5 | 1,00 | 1,03 | 1,06 | 1,09 | 1,12 | 1,16 | 1,19 | 1,23 | 1,26 | 1,30 | 1,34 |
| 10 | 1,00 | 1,05 | 1,11 | 1,17 | 1,24 | 1,31 | 1,38 | 1,45 | 1,54 | 1,62 | 1,71 |
| 12 | 1,00 | 1,06 | 1,13 | 1,21 | 1,28 | 1,37 | 1,46 | 1,56 | 1,66 | 1,78 | 1,90 |
| 15 | 1,00 | 1,08 | 1,16 | 1,26 | 1,36 | 1,47 | 1,59 | 1,73 | 1,87 | 2,04 | 2,21 |
| 18 | 1,00 | 1,09 | 1,19 | 1,31 | 1,44 | 1,58 | 1,74 | 1,92 | 2,12 | 2,34 | 2,59 |
| 20 | 1,00 | 1,10 | 1,22 | 1,34 | 1,49 | 1,66 | 1,84 | 2,05 | 2,29 | 2,57 | 2,88 |
| 25 | 1,00 | 1,12 | 1,27 | 1,44 | 1,63 | 1,86 | 2,13 | 2,45 | 2,82 | 3,25 | 3,77 |
| 30 | 1,00 | 1,15 | 1,32 | 1,53 | 1,78 | 2,09 | 2,46 | 2,92 | 3,47 | 4,14 | 4,96 |
| Kapitalzins p = 4 %/a | | | | | | | | | | | |
| Betrachtungszeitraum n, in [a] | Preissteigerung s, in [%/a] | | | | | | | | | | |
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 5 | 1,00 | 1,03 | 1,06 | 1,09 | 1,12 | 1,16 | 1,19 | 1,22 | 1,26 | 1,30 | 1,33 |
| 10 | 1,00 | 1,05 | 1,11 | 1,17 | 1,23 | 1,30 | 1,37 | 1,45 | 1,53 | 1,61 | 1,70 |
| 12 | 1,00 | 1,06 | 1,13 | 1,20 | 1,28 | 1,36 | 1,45 | 1,55 | 1,65 | 1,76 | 1,88 |
| 15 | 1,00 | 1,08 | 1,16 | 1,25 | 1,35 | 1,46 | 1,58 | 1,71 | 1,85 | 2,00 | 2,18 |
| 18 | 1,00 | 1,09 | 1,19 | 1,30 | 1,42 | 1,56 | 1,71 | 1,88 | 2,07 | 2,29 | 2,53 |
| 20 | 1,00 | 1,10 | 1,21 | 1,33 | 1,47 | 1,63 | 1,81 | 2,01 | 2,24 | 2,50 | 2,79 |
| 25 | 1,00 | 1,12 | 1,26 | 1,41 | 1,60 | 1,82 | 2,07 | 2,37 | 2,71 | 3,12 | 3,60 |
| 30 | 1,00 | 1,14 | 1,30 | 1,50 | 1,73 | 2,02 | 2,36 | 2,78 | 3,28 | 3,90 | 4,64 |

**Abbildung 36: Mittelwertfaktoren für Preissteigerungen (Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Jugend, Familie und Gesundheit 1999)**

Für die **betriebsgebundenen Kosten** wurden Kosten angesetzt, die bei der Bedienung, Wartung und Inspektion der Anlage anfallen. Insbesondere wurden Kosten für Schornsteinfegerarbeiten und Emissionsmessungen unter dieser Position verbucht. Bei größer dimensionierten Anlagen kann zusätzlich ein bestimmter Arbeits- und Personalaufwand entstehen. Für Änderungen in den betriebsgebundenen Zahlungen, wie z. B. Lohnkosten, wurden keine Preisänderungen berücksichtigt.

Für die gegenwärtige Studie wurden die betriebsgebundenen Kosten wie folgt berechnet:

- Erdgas- und Heizölkesselanlagen: 1 % der gesamten Investitionskosten für Wärmeerzeugung und -verteilung
- Wärmepumpenanlagen (inkl. geothermische Erschließung): 2 % der gesamten Investitionskosten für Wärmeerzeugung und -verteilung
- Steinkohle- und Pellet-Kesselanlagen: 3 % der gesamten Investitionskosten für Wärmeerzeugung und -verteilung

### Statische Amortisationsrechnung

Die Amortisationsrechnung ermittelt den Zeitraum, in dem das in einem Investitionsobjekt eingesetzte Kapital zurückfließt. Hierbei wird nicht die Frage der Rentabilität von Projekten geprüft, sondern es wird ein Maß für das Risiko eines Kapitalverlustes ermittelt. Das Risiko eines Investitionsprojektes steigt an, je größer die Laufzeit ist, weil die Unsicherheit ansteigt, je länger Kapital gebunden bleibt. Als Grundvoraussetzung einer wirtschaftlich sinnvollen Investition muss die Amortisationsdauer kleiner der Nutzungsdauer der Wärmeerzeugungsanlage sein. Weil die Nutzungsdauer in der gegenwärtigen Studie auf 15 Jahre festgelegt wurde, ist demnach eine Investition nur sinnvoll, wenn die Amortisationszeit unter 15 Jahren liegt. Der Ansatz einer Nutzungsdauer von 15 Jahren erfolgte in Anlehnung an die „üblichen Nutzungsdauern“ gemäß dem Hessischen Ministerium für Umwelt, Energie, Jugend, Familie und Gesundheit (1999).

Werden mehrere Investitionsobjekte vergleichen, so ist die Investition mit der geringsten Amortisationszeit die sinnvollste Variante. Die Amortisationszeit wurde nach folgender Formel berechnet:

**Amortisation = (Kapitaleinsatz) ÷ (jährlicher Kostenvorteil Geothermie + jährliche Abschreibungen)**

Der Kostenvorteil Geothermie berechnet sich aus dem jährlichen Kostenvorteil der verbrauchsgebundenen Kosten abzüglich der Summe aus kapitalgebundenen und betriebsgebundenen Mehrkosten der Wärmepumpenanlage. Die lineare jährliche Abschreibung erfolgt in jedem Jahr der Nutzung des Wirtschaftsgutes (hier Wärmeerzeugungsanlage). Abschreibungsgrundlage bilden die Anschaffungskosten. Die Abschreibungsbeträge werden über die Nutzungsdauer gleich verteilt.

**Jährlicher linearer Abschreibungsbetrag = Anschaffungskosten/Nutzungsdauer in Jahren**

## 5.3.4 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung Modellbetrieb A

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zum Modellbetrieb A ist für die verschiedenen Optionen der Beheizung im Anlagenband (5.1.2) zusammengefasst.

### Mitteltiefe Erdwärmesonden

Bei der vergleichenden Darstellung der Wärmegestehungskosten bzw. der jährlichen Heizkosten für konventionelle Heizsysteme und für bivalente Systeme unter Einbeziehung mitteltiefer Erdwärmesonden zeigt sich ein sehr eindeutiges Bild. Sowohl im bivalent parallelen als auch im bivalent alternativen Betrieb zeigen sich die Systeme mit mitteltiefen Erdwärmesonden als mit Abstand teuerstes System. Die Wärmegestehungskosten sind im Vergleich mit dem preiswertesten System (Steinkohle) doppelt bis drei Mal so hoch. Dies gilt grundsätzlich für alle Modellregionen.

Entsprechend liegen die Amortisationszeiten bivalenter Systeme mit Spitzenlastdeckung durch Heizöl oder Erdgas durchweg weit über 15 Jahre. Eine Wirtschaftlichkeit dieser Anlagen ist somit nicht in Aussicht zu stellen.

Generell erfolgte bei den bivalenten Systemen kein Vergleich mit Spitzenlastdeckung durch Steinkohle oder Pellets (gilt für den gesamten Modellbetrieb). Die Steinkohle ist das mit Abstand günstigste Heizsystem und kann selbst bei der Grundlastabdeckung nicht durch die teurere Geothermienutzung abgelöst werden. Unter Bezugnahme auf Tabelle 12 wird zudem deutlich, dass die konventionellen bivalenten Systeme Steinkohle/Heizöl und Pellet/Heizöl jeweils den Ölkessel als Spitzenlastkessel besitzen. Die Ablösung der Steinkohle als Grundlast ist wie erwähnt nicht wirtschaftlich sinnvoll, zudem würde diese Variante wieder zum bivalent geothermischen System Wärmepumpe Heizöl führen. Bei der Pelletanlage ist dies entsprechend identisch.

### Geothermische Brunnenanlagen

Bei der Betrachtung der geothermischen Brunnenanlagen zeigt sich im direkten Vergleich einer monovalenten Erdgasbeheizung mit dem bivalenten System Wärmepumpe/Erdgas, dass eine Umstellung auf eine geothermische Grundlastabdeckung ebenfalls nicht wirtschaftlich ist. Dies gilt für den bivalent parallelen und alternativen Betrieb. Die verbrauchsgebundenen Kosten fallen zwar günstiger aus als bei den konventionellen Systemen, die betriebs- und kapitalgebundenen Kosten übertreffen diesen anteiligen Kostenvorteil jedoch bei weitem. Entsprechend ergibt sich bei den jährlichen Heizkosten teilweise nur ein Kostenvorteil gegenüber der reinen Beheizung mit Heizöl. Vor allem bei einem höheren Anstieg der Energiepreise als bisher fällt der direkte Vergleich monovalenter Heizölnutzung mit dem bivalenten System Wärmepumpe/Heizöl positiv im Sinne des geothermischen Systems aus. Die Amortisationszeiten liegen hier sowohl für den bivalent alternativen als auch den bivalent parallelen Betrieb im Bereich von etwa 8 bis 9 Jahren. Auch bei gleichbleibender Preisentwicklung ergeben sich wirtschaftliche Nutzungsoptionen, weil die Amortisationszeiten dann etwa im Bereich zwischen 11 und 13 Jahren liegen. Wenn sich der Preisanstieg der Energieträger (hier insbesondere Heizöl) abschwächt, wird jedoch auch hier die Wirtschaftlichkeit enorm in Frage gestellt.

### Oberflächennahe Erdwärmesonden

Bei der Betrachtung der oberflächennahen Erdwärmesonden ergibt sich ein sehr ähnliches Bild wie bei den Brunnenanlagen. Die monovalente Beheizung über Steinkohle, Erdgas oder Pellets stellt unter Beachtung der im Anlagenband (5.1.2) dargestellten Wärmegestehungskosten das jeweils preiswerteste Heizsystem dar. Wie auch bei allen anderen Betrieben ist die Steinkohle hier mit Abstand am preiswertesten. Somit ist auch die Umstellung auf ein bivalentes System mit der Spitzenlastdeckung über Erdgas nicht wirtschaftlich darstellbar (gleiches gilt analog für die Steinkohle und Pellets).

Allein bivalente Systeme mit der Spitzenlastkomponente Heizöl und der Grundlastabdeckung über die oberflächennahen Erdwärmesonden stellen sich teilweise wirtschaftlich dar. Dies gilt vornehmlich für die Betrachtungsoptionen, bei denen sich die Energiepreise auf gleichbleibendem Niveau verteuern bzw. bei denen der Preisanstieg zukünftig noch höher anfällt. Sollte sich der Anstieg des Ölpreises gegenüber den letzten Jahren verringern, wird sich das bivalente System auch hier nicht mehr wirtschaftlich darstellen lassen.

Für die beiden erstgenannten Szenarien der Preisentwicklung ist der bivalent alternative Betrieb jeweils etwas günstiger zu bewerten. Für die Modellregionen X und Y ergibt sich die Amortisierung für den Fall einer Energiepreissteigerung von 30 % jeweils nach etwa 7 bis 8 Jahren, in der Modellregion Z ist dies (aufgrund der höheren Investitionskosten) erst nach 10 Jahren der Fall. Bei gleichbleibendem Preisanstieg sind nur die bivalent alternativen Varianten wirtschaftlich (Amortisierung in den Regionen X und Y binnen ca. 10 bzw. 12 Jahren). Die bivalent parallelen Varianten amortisieren sich innerhalb der gesetzten Zeitspanne von 15 Jahren nur bei einer Verteuerung der Energiepreise.

Es ist somit für den Modellbetrieb A festzuhalten, dass eine Umstellung der Grundlastabdeckung über die Geothermie nur für Betriebe mit bislang monovalenter Heizölnutzung wirtschaftlich interessant sein kann. Dafür kommt der Einsatz oberflächennaher Erdwärmesonden, aber auch geothermischer Brunnenanlagen in Frage. Generell sind bei bivalent alternativer Betriebsweise vielfach etwas kürzere Amortisationszeiten (Bereich von etwa 10 bis 15 Jahren bei gleichbleibendem Energiepreisanstieg) zu erwarten als im bivalent parallelen Betrieb. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn die Energiepreise (insbesondere für Heizöl) weiter ansteigen bzw. gleichbleiben. Für die Betriebe mit anderen Heizsystemen bzw. im Fall einer Abschwächung des Preisanstiegs für Heizöl ist die Umstellung auf eine geothermische Grundlastabdeckung kaum wirtschaftlich darstellbar.

## 5.4 Fördermöglichkeiten

### 5.4.1 Staatliche Förderung

Bei Modellstandort A handelt es sich um ein bestehendes Gebäude. Unter der Voraussetzung, dass vor dem 01.01.2009 der Bauantrag gestellt wurde und vor diesem Datum bereits ein Heizungssystem installiert war, ist eine Förderung der Wärmepumpenanlage über das Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) möglich. Diese gilt jedoch nur bis zu einer Heizleistung der Wärmepumpe von maximal 100 kW. Anlagen mit größerer Leistung werden hier nicht gefördert. **Eine BAFA-Förderung ist somit für die Modellbetriebe A nicht möglich (Heizleistung 140 kW).**

Das KfW-Programm Erneuerbare Energien „Premium“ fördert unter Punkt 5 „große Wärmespeicher“ mit mehr als 10 m³ Speichervolumen, unter Punkt 7 „große effiziente Wärmepumpen“ mit einer installierten Nennwärmeleistung von mehr als 100 kW und unter Punkt 8 Anlagen zur Erschließung und Nutzung von Tiefengeothernie.

Die Förderung großer Wärmespeicher beinhaltet einen Tilgungszuschuss von 250 € je Kubikmeter Speichervolumen. Als Bedingung gilt jedoch, dass das Temperaturniveau der dem Speicher entnommenen Wärme ausreicht, um die Wärmelast direkt und ohne weitere Maßnahmen zur Temperaturerhöhung zu decken. Für den Modellbetrieb A ist dies nicht der Fall, weil zumindest zeitweilig eine Temperaturerhöhung durch ein zweites Heizsystem erforderlich ist. **Der einzubauende Pufferspeicher ist somit nicht förderfähig.**

Die geplante Wärmepumpe mit einer Heizleistung von 140 kW liegt über der Mindestleistung von 100 kW und ist somit generell förderfähig. Als eine technische Voraussetzung ist der Nachweis einer Jahresarbeitszahl von wenigstens 3,8 gefordert. Eine Jahresarbeitszahl in dieser Höhe wird für den Betrieb A erwartet.

Es besteht somit die Fördermöglichkeit über das genannte KfW-Programm in Form eines Tilgungszuschusses in Höhe von 80 € je kW Wärmeleistung. **Es ist somit eine Förderung in Höhe von 11.200 € zu erwarten**. Damit liegt der Betrag über dem Mindestbetrag von 10.000 € und unter dem Maximalbetrag von 50.000 €.

Die KfW-Förderung für Tiefengeothermie ab 400 m Bohrtiefe ist – trotz der teilweisen Überschreitung dieser Grenze bei mitteltiefen Erdwärmesonden – nicht anwendbar. Hier wird eine „**Thermalfluid-Temperatur von mind. 20°C“** gefordert. Diese Temperatur wird an keinem der Standorte in den relevanten Tiefen erreicht. Zudem ist ein „Thermalfluid“ praktisch nicht vorhanden. Das Förderprogramm zielt folglich vornehmlich auf Tiefenwässer, die an den Standorten nicht zur Verfügung stehen.

Für den Modellbetrieb A ist somit eine staatliche Förderung in Höhe von 11.200 € realistisch.

### 5.4.2 Sonstige Förderung

Neben der staatlichen Förderung besteht eine weitere, „indirekte“ Förderung in der Bezugsmöglichkeit vergünstigter Strompreise der Energieversorger. Hier sind zur Berechnung die Tarife der Envia Mitteldeutsche Energie AG angesetzt worden (Wärmepumpentarif und „normaler Tarif Ökostrom):

- Wärmepumpentarif Envia M: 16,2 Cent/kWh (netto)
- Tarif Profistrom 24 h (100 % Ökostrom): 19,0 Cent/kWh (netto)

## 5.5 Fazit Modellbetrieb A

Für den Modellbetrieb A wurde für alle drei Standorte die Realisierbarkeit aller drei Wärmequellensysteme untersucht (oberflächennahe und mitteltiefe Erdwärmesonden, Brunnenanlagen). Mit Ausnahme der Brunnenanlagen am Standort C sind aus technischer Sicht alle Wärmequellensysteme an jedem Standort möglich. Dies gilt für die beiden untersuchten Varianten des bivalent parallelen bzw. alternativen Betriebs.

Bei einem Gesamtwärmebedarf des Objekts in Höhe von 529.653 kWh und einer maximal notwendigen Heizleistung von 470 kW ergibt sich für den

- **bivalent parallelen Betrieb** eine Heizleistung der Wärmepumpe von 140 kW und eine abdeckbare Heizarbeit von 470.332 kWh (Lastabdeckung zu 89 %). Im
- **bivalent alternativen Betrieb** ist bei gleicher Heizleistung der Wärmepumpe eine Heizarbeit von 311.152 kWh (50 % Lastabdeckung) realisierbar.

Im Hinblick auf die reinen Herstellungskosten incl. Wärmepumpe und Einbindung in das vorhandene Wärmenetz belaufen sich diese (je nach Wärmequelle und Standort) beim

- **bivalent parallelen Betrieb** auf ca. 383.700 € … 810.100 € und beim
- **bivalent alternativen Betrieb** auf ca. 177.300 € … 472.600 €.

Die mit Abstand höchsten Kosten fallen durchweg bei den mitteltiefen Erdwärmesonden an. Bei standortspezifischer Betrachtung sind – unabhängig vom Entzugssystem – die Kosten am Standort Z am höchsten. Dort tritt keine relevante Grundwasserbewegung auf, zudem sind die Untergrundtemperaturen am geringsten.

Während bei allen Sondensystemen keine nennenswerten Unterhaltungskosten auftreten, ist dies bei den Brunnenanlagen ein sehr deutlicher Kostenfaktor. Grund dafür ist nicht allein die regelmäßig notwendige Wartung (Reinigung, Regenerierung) der Brunnen bzw. Pumpen, sondern der weitaus größere Aufwand für die Unterhaltung der Wasseraufbereitung. Grundsätzlich ist die notwendige Wasseraufbereitung bei den Brunnenanlagen hinsichtlich der Investitionskosten als „kritischster Faktor“ zu bezeichnen.

Allein die Errichtung der technischen Anlage zur Grundwasserförderung und Reinjektion ist wirtschaftlich sehr interessant. Durch die Errichtung und den Betrieb der Wasseraufbereitung wird dieser Kostenvorteil entgegen den anderen Wärmequellensystemen jedoch mehr als übertroffen.

Überaus interessant kann die offene Grundwassernutzung hingegen bei einigen Sonderfällen sein. Wichtigste Voraussetzung dafür ist, dass keine Rückführung des Wassers in den Grundwasserleiter durchgeführt werden muss, sondern eine direkte Einleitung in die Vorflut genehmigungsfähig ist. Bei vorheriger Förderung des Grundwassers (über Brunnen) ist dies jedoch nicht realistisch. Einzelanwendungen könnten sich z. B. über nutzbare Quellaustritte ergeben. Ferner ist es nicht auszuschließen, dass kleinere, jedoch potenziell nutzbare Grundwasserlagerstätten (insbesondere Uferfiltrat) günstigere chemische Verhältnisse aufweisen und keine Aufbereitung des Wassers erfordern. Auch dafür ist jedoch von Einzelfallanwendungen auszugehen.

Bei gesamtheitlicher Wirtschaftlichkeitsbetrachtung, auch im Vergleich mit konventionellen Energieträgern, zeigt sich, dass die konventionellen, monovalenten Systeme auf der Basis von Pellets, Erdgas und allen voran Steinkohle im Vergleich mit den bivalenten Systemen unter Einbeziehung der Geothermie wirtschaftlicher abschneiden. So fallen die Wärmegestehungskosten bei alleiniger Steinkohlenutzung um etwa die Hälfte bis ein Drittel geringer aus als bei den bivalenten Systemen unter Einbeziehung der Geothermie.

Eine Umstellung der Grundlastabdeckung über die Geothermie ist somit nur für Betriebe mit bislang monovalenter Heizölnutzung wirtschaftlich interessant. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn sich der Anstieg der Energiepreise (insbesondere für Heizöl) weiter erhöht. Als geothermisches System kommt hier vor allem die Nutzung oberflächennaher Erdwärmesonden, teilweise auch die offene Grundwassernutzung in Betracht.

# 6 Modellbetrieb B

## 6.1 Energiebedarfsberechnung und $CO_2$-Bilanz

Die Berechnungen zur Ermittlung der notwendigen Wärmeleistung und des Heizenergieverbrauchs wurden mit dem Simulationsprogramm HORTEX 4.1 ermittelt. Die Ergebnisse der Simulationsrechnungen basieren auf den konstruktiven und technischen Daten der Gewächshausanlage, der für die gärtnerische Produktion geforderten Innentemperaturen und der Normaußentemperatur für den Standort der Gärtnerei (DIN 4701 bzw. EN 12831) und Testreferenzjahr (Jahresklimadatensatz GLOTESI).

Die für die Simulationsrechnung zugrunde gelegten Temperaturprogramme sind im Anlagenband (1.2) zusammengestellt (dort Tabelle 1 bis 3). Unter Berücksichtigung einer Normaußentemperatur am Standort der Gärtnerei von -14 °C (nach DIN 4701), Auslegungstemperaturen in den Gewächshauskabinen zwischen 2 und 22 °C, errechnet sich unter Berücksichtigung der Temperaturprogramme eine notwendige Gesamtheizleistung für den Betrieb von 5.900 kW (Tabelle 22). Die Ergebnisse aller Simulationsrechnungen sind im Anlagenband (3.2) beigefügt.

**Tabelle 22: Ergebnisse der Simulationsberechnungen mit HORTEX 4.1 für den Modellbetrieb B**

| | Auslegungsleistung (kW) | Heizleistung im Abtaufall (kW) | Heizenergieverbrauch (kWh) | Heizenergieverbrauch (kWh pro m² und Jahr) |
|---|---|---|---|---|
| **Abteilung 1** | 2.800 | | 2.484.693 | 248 |
| **Abteilung 2** | 2.900 | | 2.788.251 | 278 |
| **Arbeitsverbinder** | 200 | | 119.844 | 119 |
| **Gesamtbedarf** | 5.900 | 4.920 | 5.371.377 | 255 |

In der Abbildung 37 ist die benötigte Heizleistungen (kW) pro Stunde und Tag für den Modellbetrieb B dargestellt. Der Bereich unterhalb der roten Linie kennzeichnet den Bereich, welcher von der Wärmepumpe (Grundlast) mit einer Leistung von 700 kW abgedeckt wird.

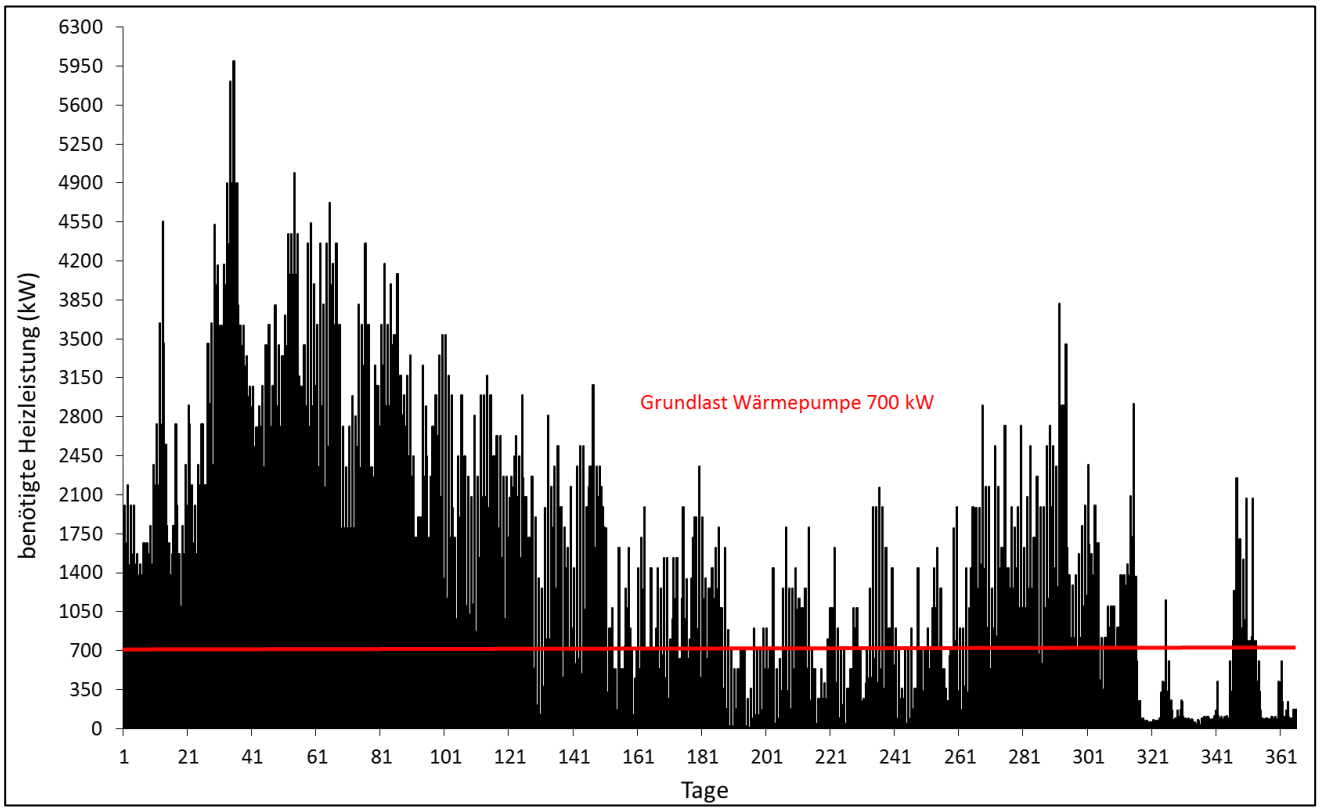
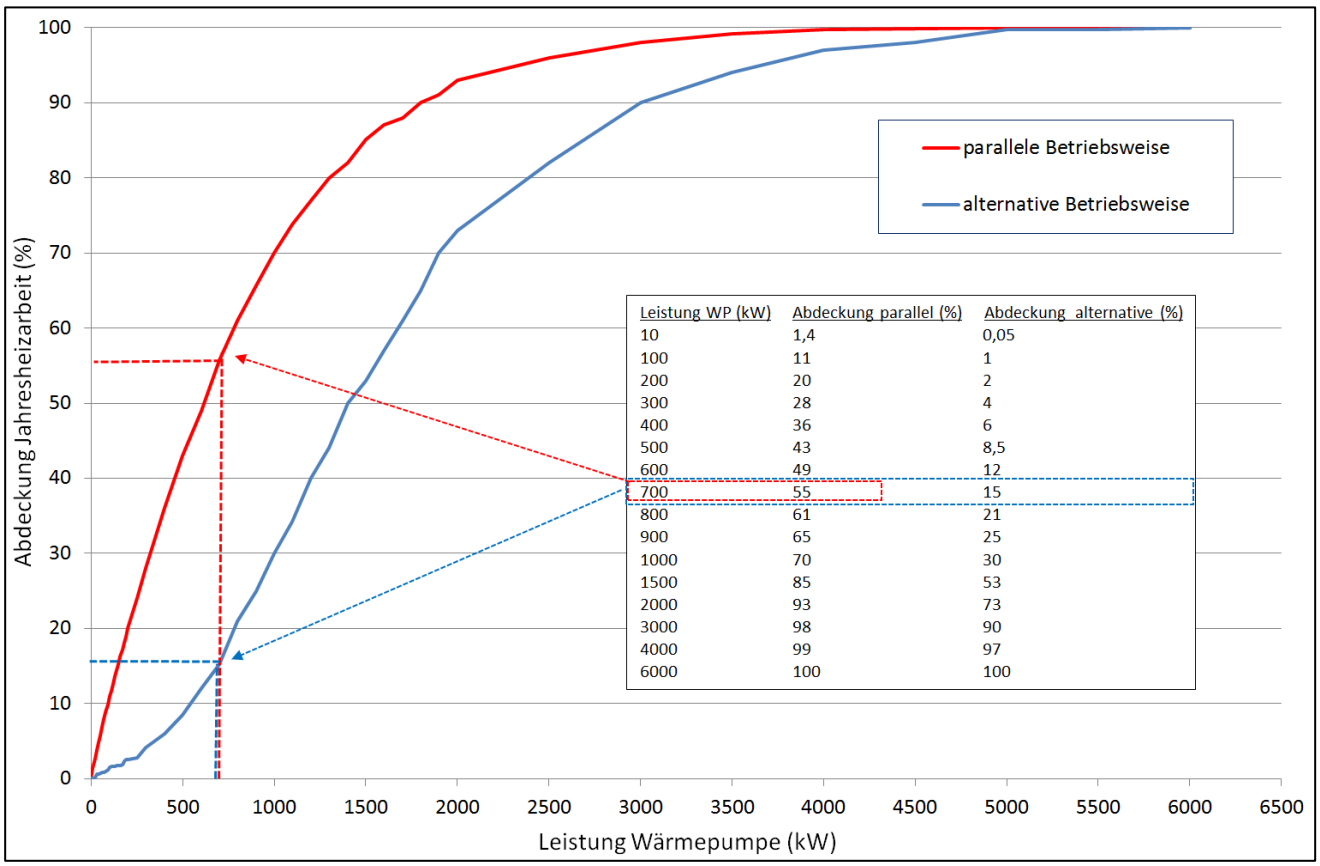



**Abbildung 37: Stündlich benötigte Heizleistung – Modellbetrieb B**

Grundsätzlich werden für den Modellbetrieb B zwei verschiedene Grund-/Spitzenlastszenarien berücksichtigt. Es wurde in der ersten Variante von einem bivalent parallelen Betrieb ausgegangen, in der zweiten Variante von bivalent alternativem Betrieb. Beide Varianten unterscheiden sich deutlich in der Lastabdeckung, obgleich die Anteile der Lastabdeckung generell deutlich geringer sind als beim Modellbetrieb A.

Abbildung 38 zeigt den Anteil der Jahresheizarbeit bei verschiedenen Heizleistungen der Wärmepumpe bei bivalent paralleler (rot) und bei bivalent alternativer (blau) Betriebsweise. Die unterbrochenen Signaturen in rot (bivalent parallel) bzw. blau (bivalent alternativ) zeigen die Abdeckung der Jahresheizarbeit bei einer ausgewählten Wärmepumpenleistung von 700 kW. Tabellarisch dargestellt ist die der Wärmepumpenleistung entsprechende Abdeckung der Jahresheizarbeit bei beiden untersuchten Betriebsweisen (blau bzw. rot unterbrochene Signatur).




| Leistung WP (kW) | Abdeckung parallel (%) | Abdeckung alternative (%) |
|---|---|---|
| 10 | 1,4 | 0,05 |
| 100 | 11 | 1 |
| 200 | 20 | 2 |
| 300 | 28 | 4 |
| 400 | 36 | 6 |
| 500 | 43 | 8,5 |
| 600 | 49 | 12 |
| 700 | 55 | 15 |
| 800 | 61 | 21 |
| 900 | 65 | 25 |
| 1000 | 70 | 30 |
| 1500 | 85 | 53 |
| 2000 | 93 | 73 |
| 3000 | 98 | 90 |
| 4000 | 99 | 97 |
| 6000 | 100 | 100 |

**Abbildung 38: Modellbetrieb B – Heizleistung und Lastabdeckung für bivalent alternativen und parallelen Betrieb**

### Bivalent paralleler Betrieb

Für den bivalent parallelen Betrieb liegt die Lastabdeckung an der Gesamtheizarbeit bei ca. 55 % und ist damit deutlich höher als beim alternativen Betrieb.

In der folgenden Abbildung ist die Jahresdauerlinie für den Modellbetrieb B dargestellt. Die grün hinterlegte Fläche stellt dabei die geothermische Grundlastabdeckung bei einer Wärmepumpenleistung von 700 kW im bivalent parallelen Betrieb dar. Die darüber liegende Fläche repräsentiert den Spitzenlastbereich, welcher konventionell abgedeckt werden muss. Unter Beachtung der berechneten Lastprofile (Stundenschritte – siehe Anlageband [3.2]) ergibt sich eine geothermisch zu erbringende **Heizarbeit von ca. 3.128.000 kWh im Jahr.**

Ein vereinfachtes Anlagenschema ist in der Abbildung 40 dargestellt. Hierbei ist zu betonen, dass die Auswahl und Positionierung der Soleumwälzpumpen jeweils für den Einzelfall individuell angepasst werden muss.

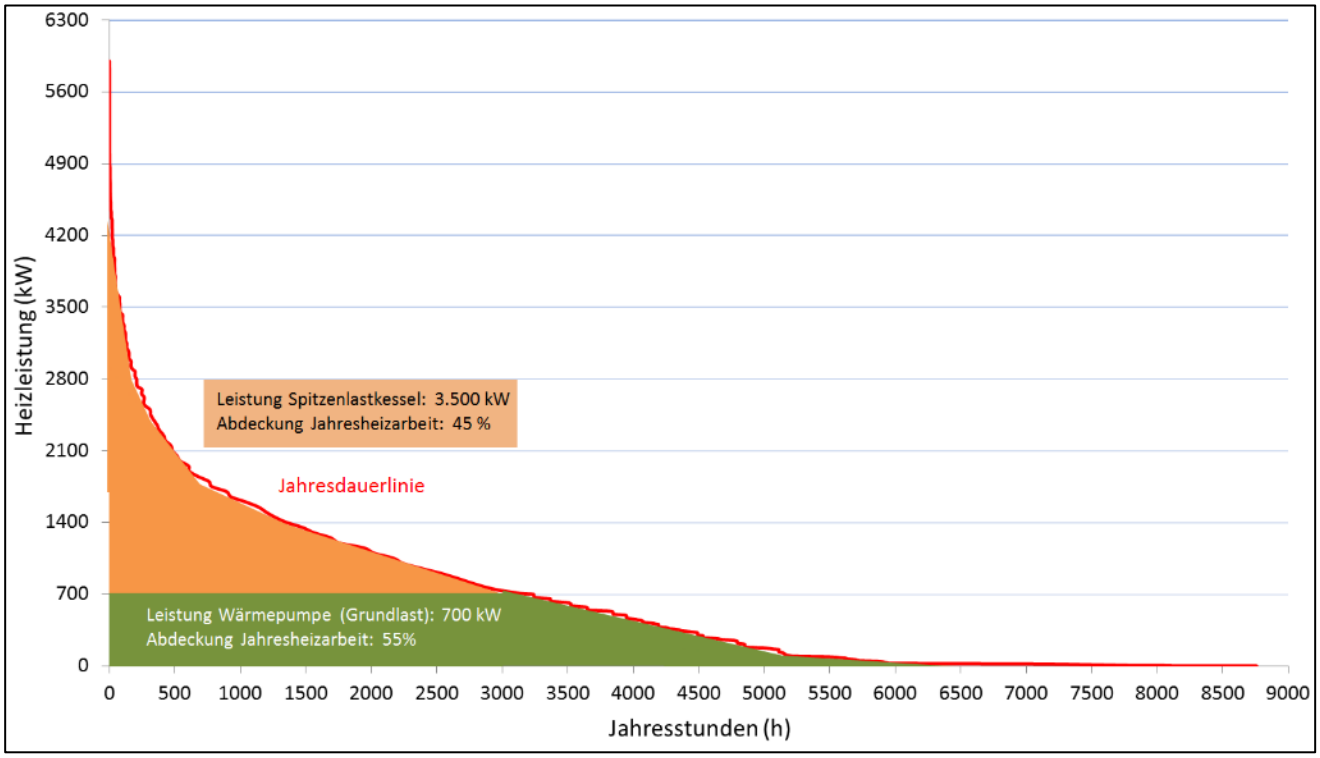



**Abbildung 39: Jahresdauerlinie mit Darstellung der Lastabdeckung (Betrieb B, bivalent parallel)**

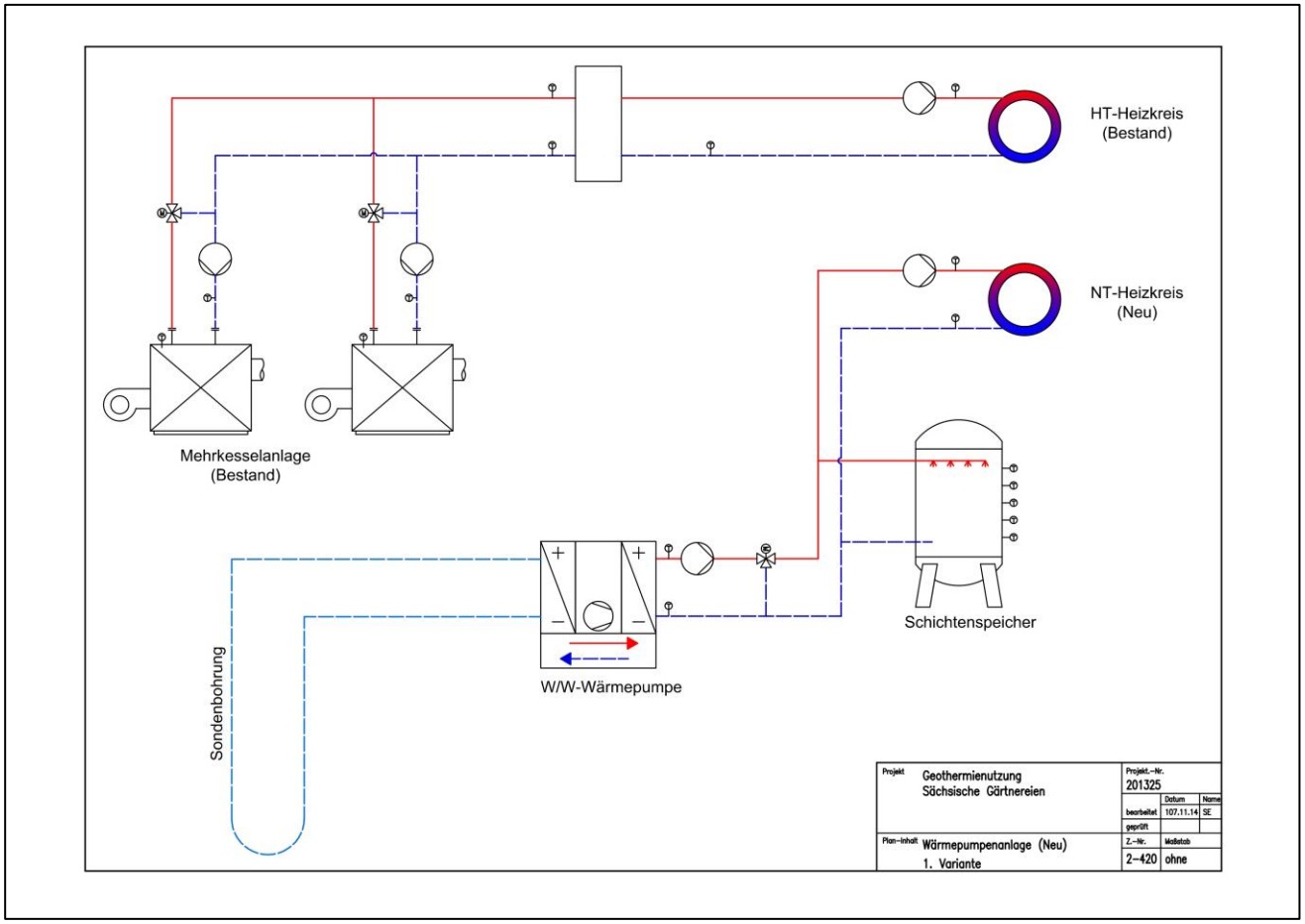



**Abbildung 40: Heizungsschema (bivalent parallel) für Integrierung einer Wärmepumpe in bestehendes Heizungssystem – Modellbetrieb B**

Weil es sich beim Modellbetrieb B um einen Bestandsbau handelt, wurden vor dem Hintergrund der Vergleichbarkeit verschiedener Wärmeversorgungssysteme neben dem Wärmepumpenbetrieb auch konventionelle Versorgungsmöglichkeiten betrachtet. Tabelle 23 gibt einen Überblick über die dabei betrachteten Versorgungskonzepte. In der Tabelle 24 sind die Ergebnisse der für das jeweilige System erfolgten Kesseldimensionierung enthalten.

**Tabelle 23: Untersuchte Wärmeversorgungskonzepte für den Modellbetrieb B beim bivalent parallelen Betrieb**

| Variante | Leistungsaufteilung | | Wärmebedarfsdeckung | |
|---|---|---|---|---|
| | Grundlast (%) | Spitzenlast (%) | Grundlast (%) | Spitzenlast (%) |
| Heizöl | 100 | 0 | 100 | 0 |
| Erdgas | 100 | 0 | 100 | 0 |
| Steinkohle + Heizöl | 30 | 70 | 78 | 22 |
| Pellets + Heizöl | 30 | 70 | 78 | 22 |
| Elektro-Wärmepumpe + Heizöl | 17 | 83 | 55 | 45 |
| Elektro-Wärmepumpe + Erdgas | 17 | 83 | 55 | 45 |

**Tabelle 24: Kesseldimensionierung für den Modellbetrieb B beim bivalent parallelen Betrieb**

| Variante | Leistungsaufteilung | |
|---|---|---|
| | Grundlast (kW) | Spitzenlast (kW) |
| Heizöl | 2.100 (frostfrei) | 2.100 (frostfrei) |
| Erdgas | 2.100 (frostfrei) | 2.100 (frostfrei) |
| Steinkohle + Heizöl | 1.200 | 2 x 1.500 |
| Pellets + Heizöl | 1.200 | 2 x 1.500 |
| Elektro-Wärmepumpe + Heizöl | 700 | 2 x 1.750 |
| Elektro-Wärmepumpe + Erdgas | 700 | 2 x 1.750 |

Die **$CO_2$-Bilanz** für die betrachteten Wärmeversorgungskonzepte ist in der nachfolgenden Tabelle und in Abbildung 41 zusammengefasst. Die Bilanzen für den bivalent alternativen Wärmepumpenbetrieb sind in der Abbildung bereits mit aufgeführt.

Wie zu erkennen ist, liegt der $CO_2$-Ausstoß der geothermischen Nutzungskonzepte erwartungsgemäß durchweg deutlich unter dem bei ausschließlicher Nutzung fossiler Energieträger. Lediglich die Kombination aus Pellets und fossilen Energieträgern ist hinsichtlich des $CO_2$-Ausstoßes noch günstiger.

**Tabelle 25: Wärmebedarf und $CO_2$-Emissionen beim bivalent parallelen Betrieb – Modellbetrieb B**

| Energieträger | $CO_2$-Äquivalent inkl. Vorketten nach GEMIS 4.8, in kg pro kWh |
|---|---|
| Heizöl | 0,302 |
| Erdgas | 0,224 |
| Steinkohle | 0,438 |
| Pellets | 0,041 |
| Deutscher Strommix | 0,633 |
| Ökostrom | 0,04 |

| Energievarianten | Energieverbrauch | Stromverbrauch, in kWh | $CO_2$-Ausstoß, in t pro a (Ökostromnutzung) | $CO_2$-Ausstoß, in t pro a (Nutzung Deutscher Strommix) |
|---|---|---|---|---|
| Heizöl | 593.260 l/a | 113.396 | 1.807 | 1.874 |
| Erdgas | 628.231 m³/a | 113.396 | 1.461 | 1.528 |
| Steinkohle + Heizöl | 598.240 kg/a + 114.298 l/a | 223.865 | 2.672 | 2.805 |
| Pellets + Heizöl | 1.070.474 kg/a + 114.298 l/a | 225.824 | 575 | 710 |
| Elektro-Wärmepumpe (JAZ 3,8) + Erdgas | 262.407 m³/a | 997.186 | 646 | 1.239 |
| Elektro-Wärmepumpe (JAZ 3,8) + Heizöl | 247.800 l/a | 997.186 | 790 | 1.384 |

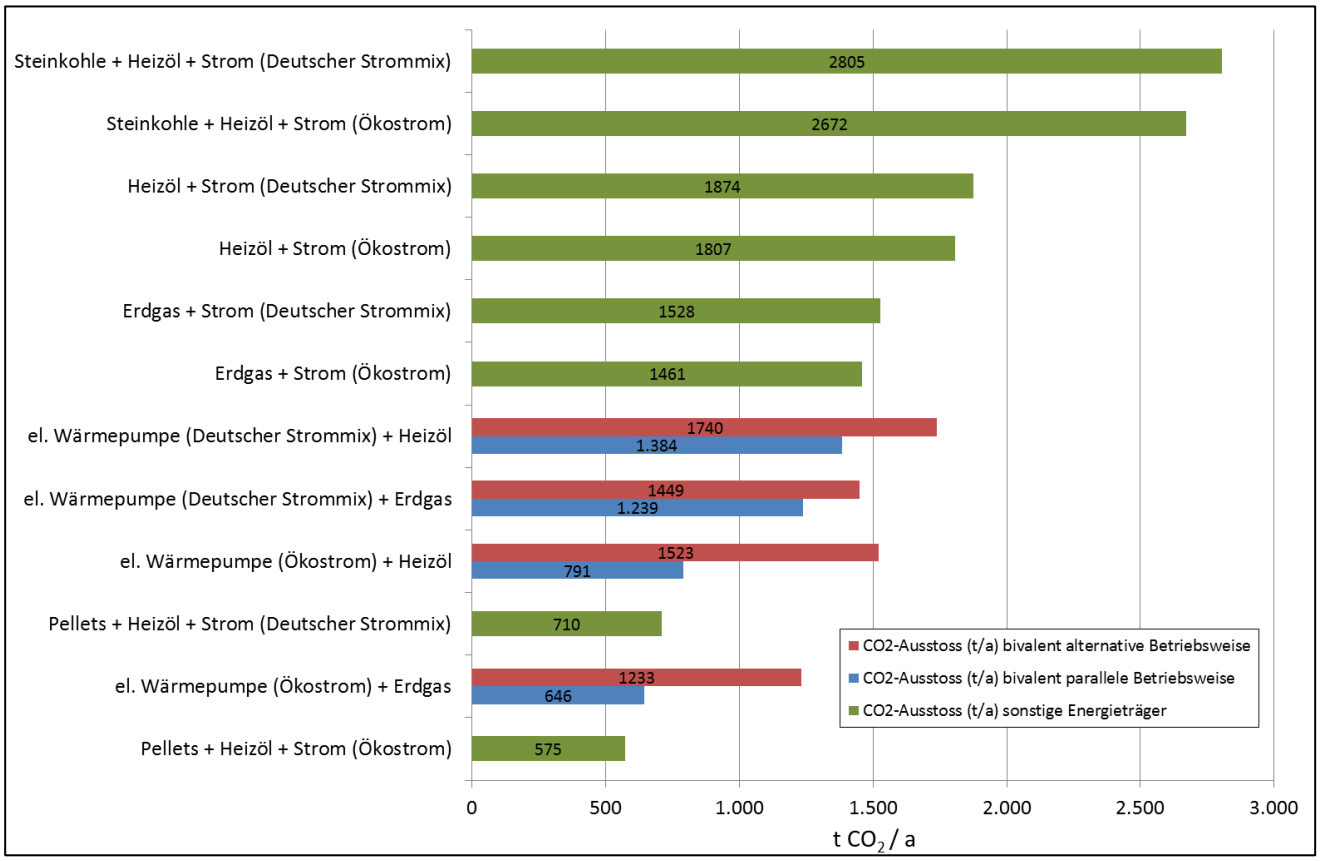



**Abbildung 41: $CO_2$-Ausstoß (t/a) unterschiedlicher Energievarianten – Modellbetrieb B**

### Bivalent alternativer Betrieb

Für den bivalent alternativen Betrieb liegt die Lastabdeckung an der Gesamtheizarbeit bei ca. 15 % und ist damit deutlich geringer als beim parallelen Betrieb.

In der Abbildung 42 ist die Jahresdauerlinie für den Modellbetrieb B dargestellt. Die grün hinterlegte Fläche stellt dabei die geothermische Grundlastabdeckung bei einer Wärmepumpenleistung von 700 kW im bivalent alternativen Betrieb dar. Die daneben liegende gelbe Fläche repräsentiert den Spitzenlastbereich, der konventionell abgedeckt werden muss. Die grün-gelb schraffierte Fläche stellt einen nicht quantifizierbaren Übergangsbereich dar, in dem ein bivalent paralleler Betrieb von Wärmepumpe und Spitzenlastkessel stattfindet (z. B. bei der Rücklaufanhebung der Spitzenlastkesselanlage). Aufgrund des geringen Lastanteils ist eine genauere Spezifizierung hier weniger relevant. Unter Beachtung der berechneten Lastprofile (Stundenschritte – siehe Anlagenband [3.2]) ergibt sich eine geothermisch zu erbringende **Heizarbeit von ca. 862.600 kWh im Jahr.**

Ein vereinfachtes Anlagenschema ist in der Abbildung 43 dargestellt. Hierbei ist zu betonen, dass die Auswahl und Positionierung der Soleumwälzpumpen auch hier jeweils für den Einzelfall individuell angepasst werden muss.

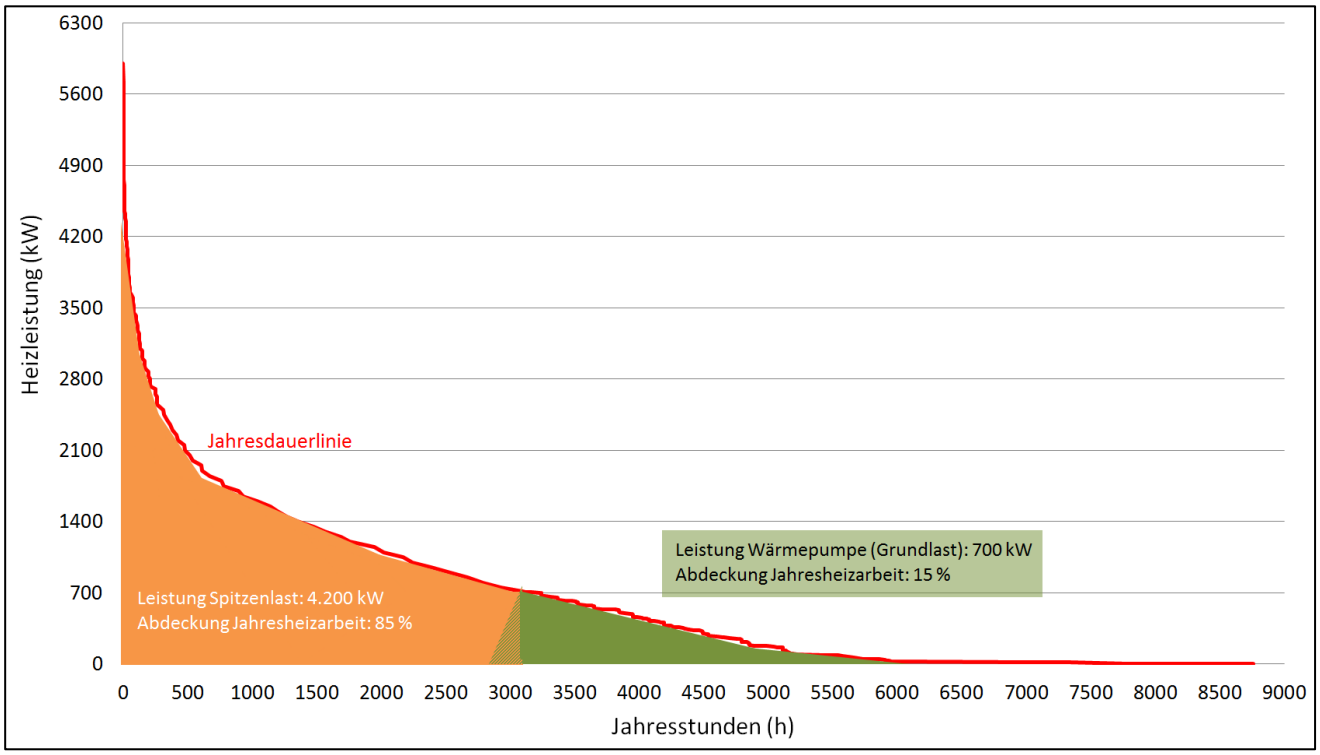



**Abbildung 42: Jahresdauerlinie mit Darstellung der Lastabdeckung (Betrieb B, bivalent alternativer Betrieb)**

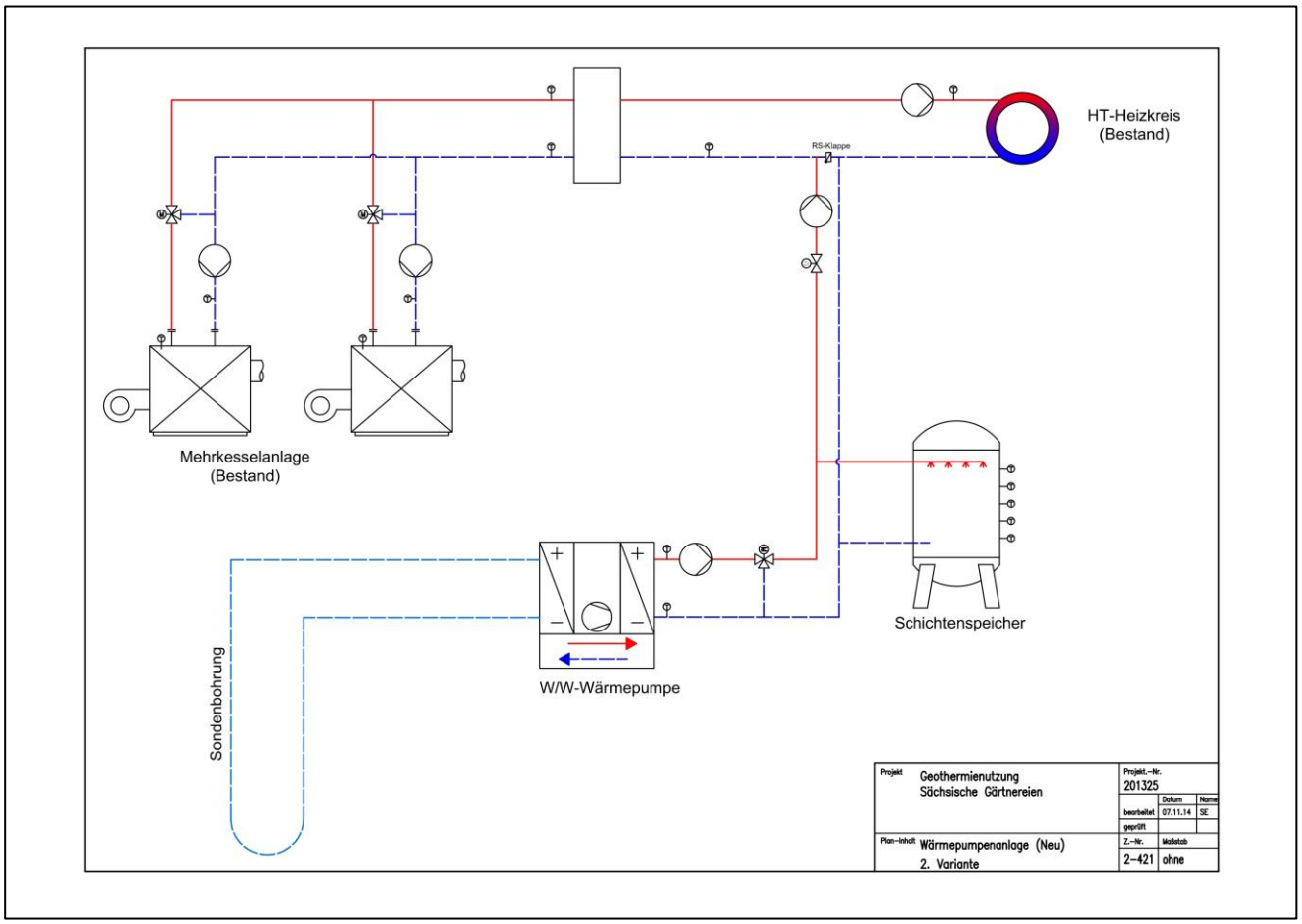



**Abbildung 43: Heizungsschema (bivalent alternativ) für Integrierung einer Wärmepumpe in bestehendes Heizungssystem – Modellbetrieb B**

Wie bereits beim bivalent parallelen Betrieb sind auch für die alternative Betriebsweise verschiedene konventionelle Wärmeversorgungssysteme neben dem Wärmepumpenbetrieb untersucht worden (siehe Tabelle 26 und Tabelle 27).

**Tabelle 26: Untersuchte Wärmeversorgungskonzepte für den Modellbetrieb B bei bivalent alternativem Betrieb**

| Variante | Leistungsaufteilung | | Wärmebedarfsdeckung | |
|---|---|---|---|---|
| | Grundlast (%) | Spitzenlast (%) | Grundlast (%) | Spitzenlast (%) |
| Heizöl | 100 | 0 | 100 | 0 |
| Erdgas | 100 | 0 | 100 | 0 |
| Steinkohle + Heizöl | 30 | 70 | 78 | 22 |
| Pellets + Heizöl | 30 | 70 | 78 | 22 |
| Elektro-Wärmepumpe + Heizöl | 30 | 100 | 15 | 85 |
| Elektro-Wärmepumpe + Erdgas | 30 | 100 | 15 | 85 |

**Tabelle 27: Kesseldimensionierung für den Modellbetrieb B beim bivalent alternativen Betrieb**

| Variante | Leistungsaufteilung | |
|---|---|---|
| | Grundlast (kW) | Spitzenlast (kW) |
| Heizöl | 2.100 (frostfrei) | 2.100 (frostfrei) |
| Erdgas | 2.100 (frostfrei) | 2.100 (frostfrei) |
| Steinkohle + Heizöl | 1.200 | 2 x 1.500 |
| Pellets + Heizöl | 1.200 | 2 x 1.500 |
| Elektro-Wärmepumpe + Heizöl | 700 | 2 x 2.100 |
| Elektro-Wärmepumpe + Erdgas | 700 | 2 x 2.100 |

Die **$CO_2$-Bilanz** für die betrachteten Wärmeversorgungskonzepte ist in der nachfolgenden Tabelle und in Abbildung 41 zusammengefasst. Wie zu erkennen ist, liegt der $CO_2$-Ausstoß der geothermischen Nutzungskonzepte auch für den bivalent alternativen Betrieb erwartungsgemäß durchweg deutlich unter dem bei ausschließlicher Nutzung fossiler Energieträger. Lediglich die Kombination aus Pellets und fossilen Energieträgern ist hinsichtlich des $CO_2$-Ausstoßes noch günstiger.

**Tabelle 28: Wärmebedarf und $CO_2$-Emissionen beim bivalent alternativen Betrieb – Modellbetrieb B**

| Energieträger | $CO_2$-Äquivalent inkl. Vorketten nach GEMIS 4.8, in kg pro kWh | | | |
|---|---|---|---|---|
| Heizöl | 0,302 | | | |
| Erdgas | 0,224 | | | |
| Steinkohle | 0,438 | | | |
| Pellets | 0,041 | | | |
| Deutscher Strommix | 0,633 | | | |
| Ökostrom | 0,04 | | | |
| **Energievarianten** | **Energieverbrauch** | **Stromverbrauch, in kWh** | **$CO_2$-Ausstoß, in t pro a (Ökostromnutzung)** | **$CO_2$-Ausstoß, in t pro a (Nutzung Deutscher Strommix)** |
| Heizöl | 593.260 l/a | 113.396 | 1.807 | 1.874 |
| Erdgas | 628.231 m³/a | 113.396 | 1.461 | 1.528 |
| Steinkohle + Heizöl | 598.240 kg/a + 114.298 l/a | 223.865 | 2.672 | 2.805 |
| Pellets + Heizöl | 1.070.474 kg/a + 114.298 l/a | 225.824 | 575 | 710 |
| Elektro-Wärmepumpe (JAZ 3,8) + Erdgas | 527.343 m³/a | 358.294 | 1.233 | 1.449 |
| Elektro-Wärmepumpe (JAZ 3,8) + Heizöl | 497.988 l/a | 358.294 | 1.523 | 1.740 |

Neben dem eigentlichen Energiebedarf für die Gewächshaustemperierung müssen für beide Varianten (bivalent alternativ und parallel) auch die Anteile der Zusatzenergie für die Energiebereitstellung und -ausbringung ausgewiesen werden. Die Berechnung der Zusatzenergie erfolgt gemäß eines prozentualen Ansatzes des Gesamtenergiebedarfs (Tabelle 29).

**Tabelle 29: Berechnung der Zusatzenergie für Energiebereitstellung und -ausbringung beim bivalent parallelen und bivalent alternativen Betrieb (% vom Gesamtenergiebedarf)**

| - | Zusatzenergie Bereitstellung | Zusatzenergie Ausbringung |
|---|---|---|
| **Heizölkessel** | 1% | 1% |
| **Erdgaskessel** | 1% | 1% |
| **Steinkohlekessel** | 3% | 1% |
| **Pellet-Kessel** | 3% | 1% |
| **Elektro-Wärmepumpe** | - | 1% |

# 6.2 Auslegung der geothermischen Systeme

## 6.2.1 Modellregion X (Raum Dresden)

### 6.2.1.1 Überblick der untersuchten Wärmequellensysteme

In der Region X ist für den Modellbetrieb B nur ein geothermisches Entzugsverfahren untersucht worden. Als einziges geothermisches Entzugssystem ist die Nutzung über Brunnen realistisch.

Aufgrund der Betriebsgröße/-struktur ist allein für eine reichlich 50%ige Lastabdeckung eine Heizarbeit von 3.128.000 kWh im Jahr erforderlich. Im Vergleich mit dem Betrieb A im ebenfalls bivalent parallelen Betrieb (140 kW Heizleistung) bedeutet dies eine mehr als 6,7 Mal höhere Heizlast.

Werden in einer stark vereinfachten (und zu konservativen) Betrachtung die genannten Wärmequellenanlagen um den Faktor der Heizlaststeigerung bei Betrieb B vergrößert (Faktor 6,7), ergäbe sich für den Betrieb B bei bivalent parallelem Betrieb eine Anzahl von 181 Erdwärmesonden à 130 m Endteufe oder 47 Erdwärmesonden à 410 m Tiefe.

Für den Modellbetrieb B ist die Nutzung über oberflächennahe bzw. mitteltiefe Erdwärmesonden bei beiden Nutzungsszenarien folglich mit sehr hohen Investitionskosten verbunden, die eine wirtschaftliche Realisierbarkeit bereits vorab in Frage stellen. Zudem sind wenigstens im bivalent parallelen Betrieb die verfügbaren Platzverhältnisse nicht ausreichend zur Installation der jeweiligen Sondenanlage. Detailliertere Ausführungen dazu enthält Kapitel 6.3.2.

Die offene Grundwassernutzung über Brunnen ist in der Region X als einziges System untersucht worden. Es erfolgten somit zwei numerische 3D-Modellierungen der erforderlichen Wärmequellenanlagen.

### 6.2.1.2 Ergebnisse Variante I – bivalent paralleler Betrieb

#### Brunnenanlage

Wie auch beim Modellbetrieb A wird am Standort X der von 1,0–20,0 m u. GOK reichende GWL genutzt. Im Ergebnis durchgeführter Recherchen handelsüblicher Wärmepumpen ist für die benötigte Heizleistung von 700 kW ein stündliches Grundwasservolumen zwischen ca. 81 und 100 m³/h erforderlich (bei zulässiger Temperaturspreizung von 6 K). Das System aus Förder- und Injektionsbrunnen ist daher so zu planen, dass die Bereitstellung dieser Wassermengen nachhaltig ohne weiteres möglich ist. In der Tabelle 30 sind Bohrung und Ausbau der Brunnen in Kurzform zusammengefasst. Die räumliche Darstellung der Brunnen enthält Abbil-

dung 44. Für die genaue Erkundung der Brunnen bzw. deren Ausbaubemessung wurden mindestens vier Vorbohrungen kalkuliert.

**Tabelle 30: Modellbetrieb B, Region X – Auslegung der Brunnenanlagen (beide Varianten)**

| - | Förderbrunnen | Injektionsbrunnen |
|---|---|---|
| Anzahl (Stück) | 3 | 4 |
| Bohrteufe (m u. GOK) | 21 | 21 |
| Ausbauteufe (m u. GOK) | 20,5 | 20,5 |
| Mindestbohrdurchmesser (mm) | 480 | 420 |
| Ausbaudurchmesser (mm) | 250 | 200 |
| Länge Sumpfrohr Edelstahl V2A (m) | 0,5 | 0,5 |
| Länge Filterrohr Edelstahl V2A (m) | 8,0 | 10,0 |
| Länge Vollrohr Edelstahl V2A (m) | 4,0 | 4,0 |
| Länge Vollrohr PVC (m) | 8,0 | 6,0 |

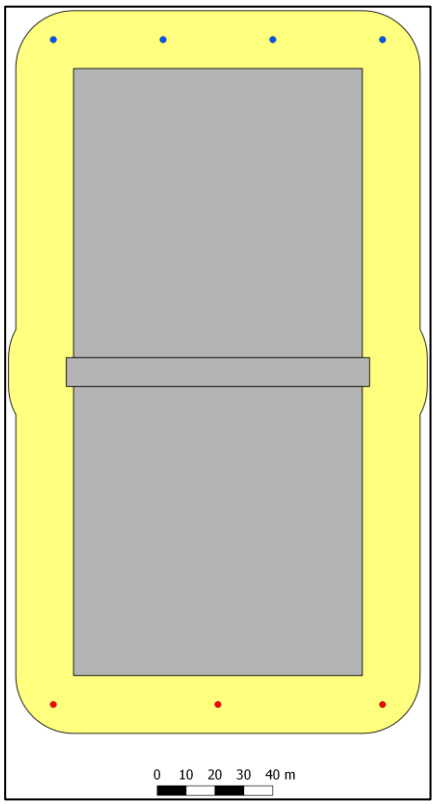



**Abbildung 44: Modellbetrieb B, Region X – offene Grundwassernutzung, Anordnung der Brunnen**

Wie der Abbildung 45 zu entnehmen ist, stellt sich bei der offenen Grundwassernutzung bereits nach wenigen Jahren ein hydraulischer Kurzschluss zwischen Förder- und Injektionsbrunnen ein. Der vorhandene GWL ist somit nicht in der Lage, die nötigen Fördermengen in der erforderlichen Zeitdauer bereitzustellen. Somit ist für den Modellbetrieb B am Standort X bei bivalent parallelem Betrieb kein geothermisches System nutzbar.

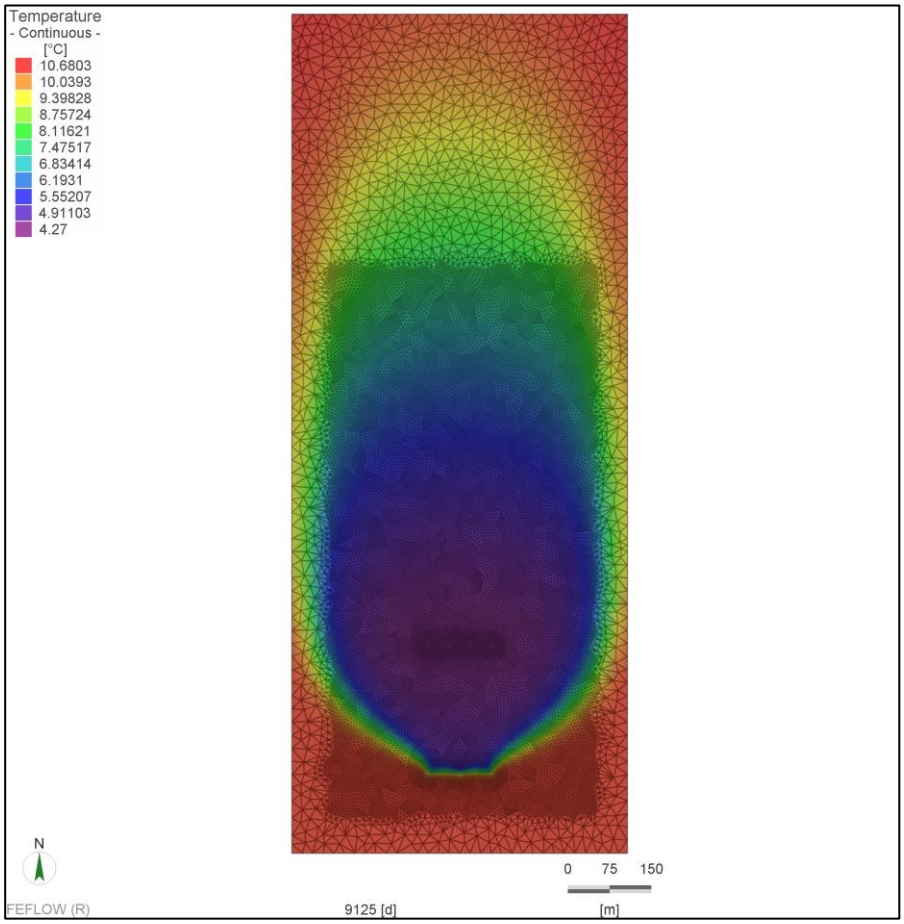



**Abbildung 45: Modellbetrieb B, Region X – offene Grundwassernutzung, hydraulischer Kurzschluss der Brunnenanlage (bivalent paralleler Betrieb)**

#### 6.2.1.3 Ergebnisse Variante II – bivalent alternativer Betrieb

**Brunnenanlage**

Für die Betrachtung der bivalent alternativen Betriebsweise werden die identischen Randbedingungen hinsichtlich genutzter GWL und notwendiger Förderleistungen wie bei bivalent parallelem Betrieb angesetzt. Entsprechend ist auch die Konzeption und Anordnung der Brunnen identisch (siehe Abbildung 44 und Tabelle 30).

Wie in Abbildung 46 dargestellt, ist für die vorliegende Modellbetrachtung im Gegensatz zum vorangestellten Szenario eine offene Grundwassernutzung möglich. Die von den Injektionsbrunnen ausgehende Abkühlungsfront beeinflusst den Förderbrunnen auch nach 25 Jahren nicht. Die gewählte Brunnenkonfiguration ist somit ausreichend (hinsichtlich Anzahl, Lage und Ausbau). Trotz gleicher Leistung der Wärmepumpe und somit identischer Fördermenge **je Stunde** kommt es nicht zum hydraulischen Kurzschluss, weil die Gesamtfördermenge (z. B. bezogen auf einen Monat) deutlich geringer ausfällt.

In der Abbildung 25 des Anlagenbandes (4.2) ist eine horizontale Schnittdarstellung in 18 m Tiefe durch die Brunnenanlage enthalten. Wie dort zu erkennen ist, fällt die Absenkung (Förderbetrieb) bzw. die Aufhöhung (Reinjektion) im Bereich des Grundwasserleiters moderat aus.

Die vorherige Aufbereitung des Grundwassers ist bei einer offenen Grundwassernutzung am Standort X generell erforderlich, um einen **langjährig sicheren Betrieb** zu ermöglichen.

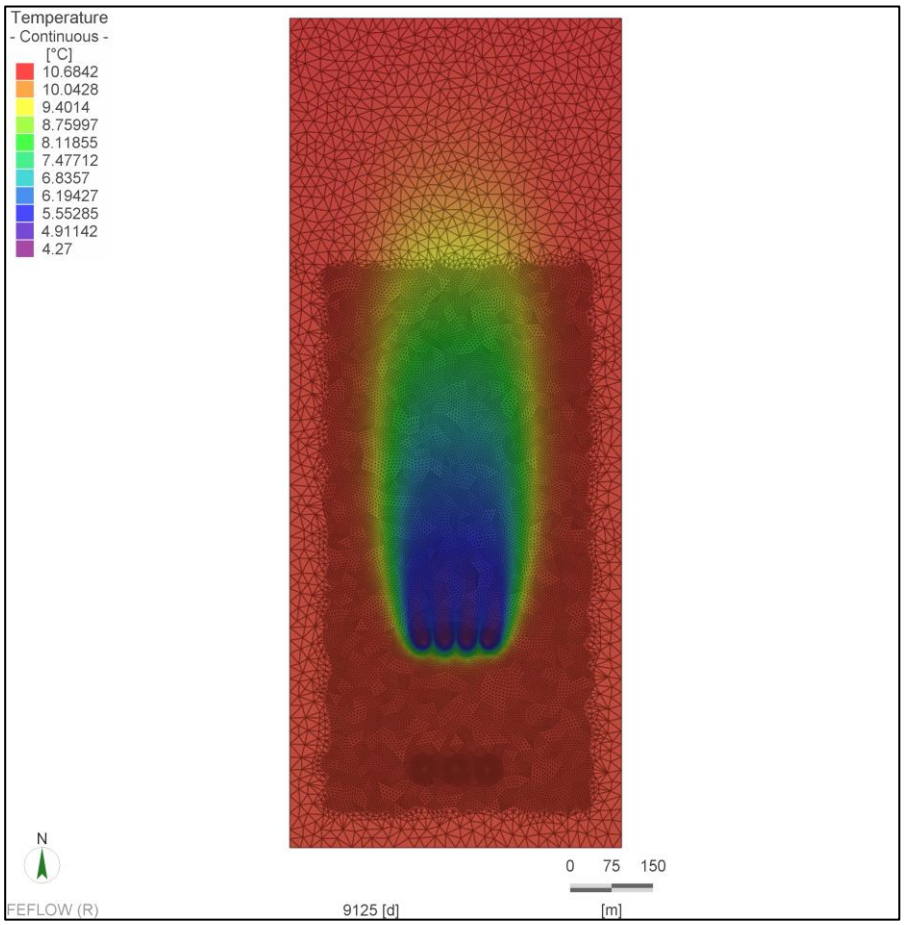



**Abbildung 46: Modellbetrieb B, Region X – offene Grundwassernutzung, Temperaturverhältnisse im Grundwasser nach 25 Jahren (bivalent alternativer Betrieb)**

### 6.2.2 Modellregion Y (Raum Leipzig)

#### 6.2.2.1 Überblick der untersuchten Wärmequellensysteme

In der Region Y sind für den Modellbetrieb B (in den Varianten I – bivalent parallel und II – bivalent alternativ) ebenfalls nur die geothermischen Brunnenanlage betrachtet worden. Die Begründung dafür erfolgt analog der Region X (Kapitel 6.2.1).

Es erfolgten somit auch hier zwei numerische 3D-Modellierungen der erforderlichen Wärmequellenanlagen.

#### 6.2.2.2 Ergebnisse Variante I – bivalent paralleler Betrieb

**Brunnenanlage**

Am Standort Y wird der erste bedeckte GWL von 10,0–25,0 m u. GOK genutzt. Auch hier wird zum Betrieb einer Wärmepumpe mit 700 kW Heizleistung ein stündliches Grundwasservolumen zwischen ca. 81 und 100 m³/h benötigt (bei zulässiger Temperaturspreizung von 6 K).

In der Tabelle 31 sind Bohrung und Ausbau der Brunnen in Kurzform zusammengefasst. Die räumliche Darstellung der Brunnen ist identisch dem Standort X (Abbildung 44). Für die genaue Erkundung der Brunnen bzw. deren Ausbaubemessung wurden mindestens vier Vorbohrungen kalkuliert.

**Tabelle 31: Modellbetrieb B, Region Y – Auslegung der Brunnenanlagen (beide Varianten)**

| - | Förderbrunnen | Injektionsbrunnen |
|---|---|---|
| Anzahl (Stück) | 3 | 4 |
| | | |
| Bohrteufe (m u. GOK) | 26 | 26 |
| Ausbauteufe (m u. GOK) | 25,5 | 25,5 |
| Mindestbohrdurchmesser (mm) | 530 | 480 |
| Ausbaudurchmesser (mm) | 300 | 250 |
| Länge Sumpfrohr Edelstahl V2A (m) | 0,5 | 0,5 |
| Länge Filterrohr Edelstahl V2A (m) | 8,0 | 10,0 |
| Länge Vollrohr Edelstahl V2A (m) | 4,0 | 4,0 |
| Länge Vollrohr PVC (m) | 13,0 | 11,0 |

Wie in Abbildung 47 darstellt, ist für die vorliegende Modellbetrachtung eine offene Grundwassernutzung nicht möglich. Wie auch in der Region X stellt sich im bivalent parallelen Betrieb aufgrund der Fördermengen rasch ein hydraulischer Kurzschluss ein. Die von den Injektionsbrunnen ausgehende Abkühlungsfront beeinflusst die Förderbrunnen so stark, dass eine Nutzung nicht mehr möglich ist. Somit ist für den Modellbetrieb B auch am Standort Y bei bivalent parallelem Betrieb kein geothermisches System nutzbar.

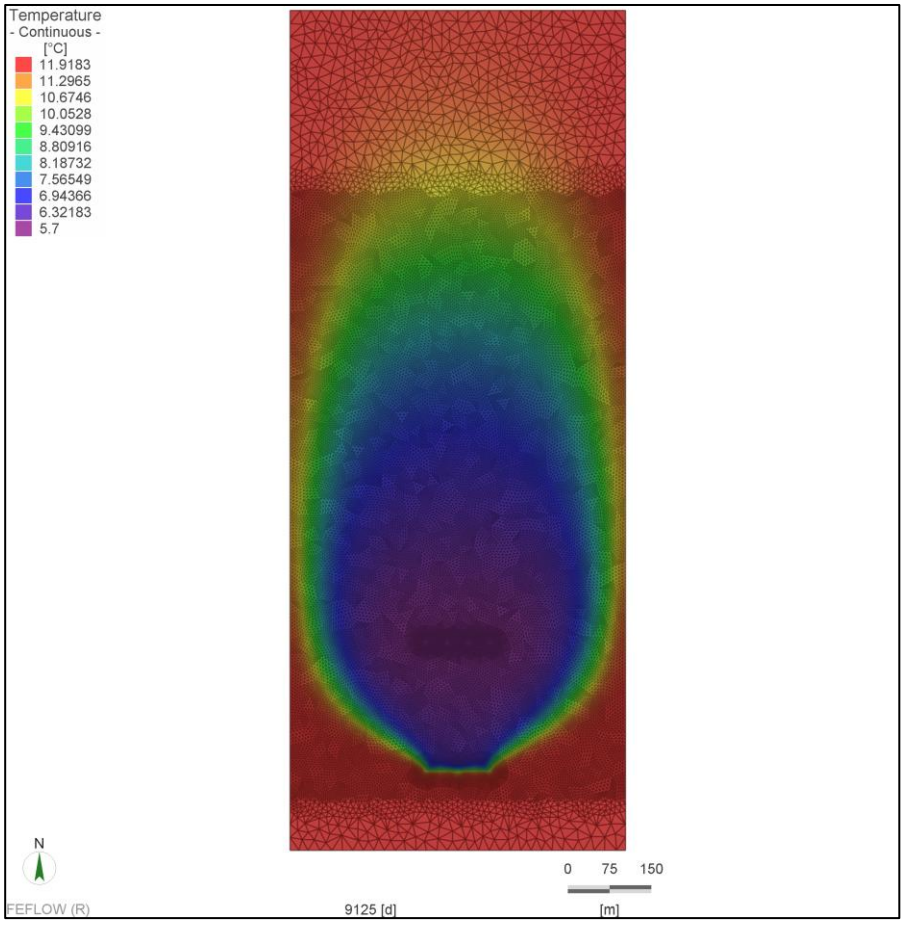



**Abbildung 47: Modellbetrieb B, Region Y – offene Grundwassernutzung, hydraulischer Kurzschluss der Brunnenanlage (bivalent paralleler Betrieb)**

### 6.2.2.3 Ergebnisse Variante II – bivalent alternativer Betrieb

#### Brunnenanlage

Für die Betrachtung der bivalent alternativen Betriebsweise werden die identischen Randbedingungen hinsichtlich genutzter GWL und notwendiger Förderleistungen wie bei bivalent parallelem Betrieb angesetzt. Die Brunnenplanung einschließlich der Lage ist identisch.

Wie in Abbildung 48 dargestellt, ist für die vorliegende Modellbetrachtung im Gegensatz zum vorangestellten Szenario eine offene Grundwassernutzung möglich. Die von den Injektionsbrunnen ausgehende Abkühlungsfront beeinflusst den Förderbrunnen auch nach 25 Jahren nicht. Die gewählte Brunnenkonfiguration ist somit ausreichend (hinsichtlich Anzahl, Lage und Ausbau). Trotz gleicher Leistung der Wärmepumpe und somit identischer Fördermenge **je Stunde** kommt es nicht zum hydraulischen Kurzschluss, weil die Gesamtfördermenge (z. B. bezogen auf einen Monat) deutlich geringer ausfällt.

Die vorherige Aufbereitung des Grundwassers ist bei einer offenen Grundwassernutzung am Standort Y generell erforderlich, um einen **langjährig sicheren Betrieb** zu ermöglichen.

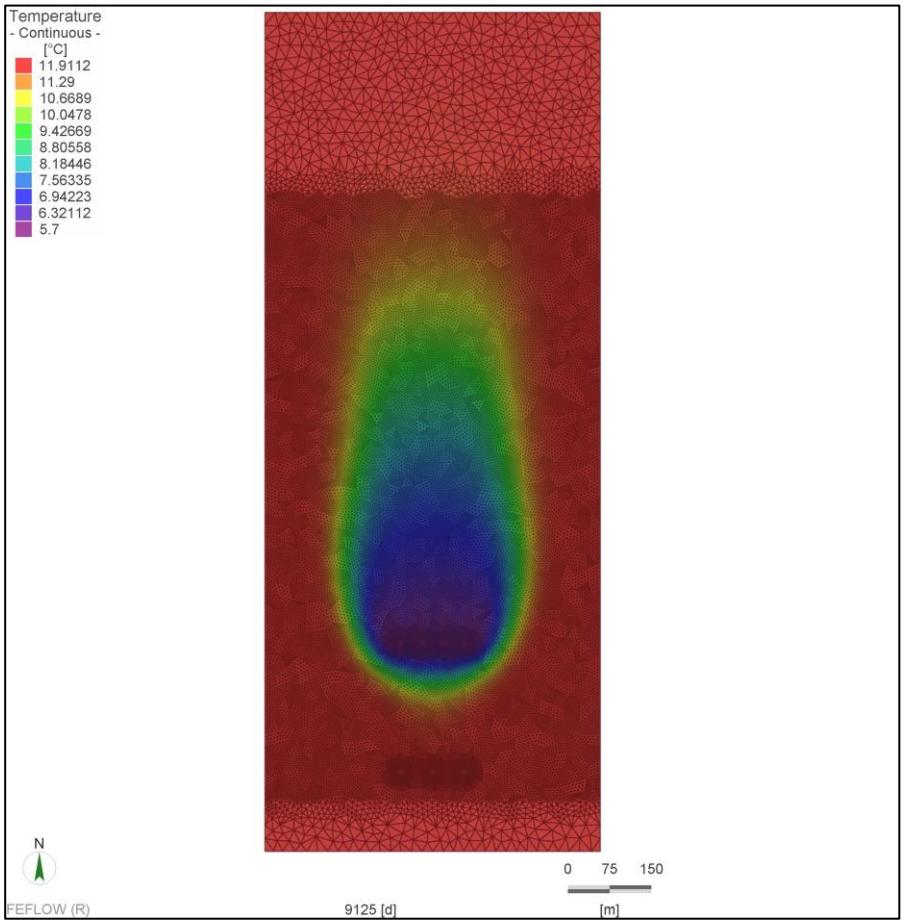



**Abbildung 48: Modellbetrieb B, Region Y – offene Grundwassernutzung, Temperaturverhältnisse im Grundwasser nach 25 Jahren (bivalent alternativer Betrieb)**

### 6.2.3 Modellregion Z (Raum Chemnitz)

#### 6.2.3.1 Überblick der untersuchten Wärmequellensysteme

In der Region Z ist keine Lockergesteinsbedeckung vorhanden, nutzbare GWL existieren nicht. Weil die Sondensysteme wie eingangs erwähnt nicht realisierbar sind und eine offene Grundwassernutzung aufgrund fehlender GWL ebenfalls nicht in Frage kommt, gibt es in der Region Z keine geothermischen Nutzungsmöglichkeiten für den Modellbetrieb B.

## 6.3 Investitionskosten und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

### 6.3.1 Entwicklung der Energiekosten

Eine wichtige Randbedingung für objektive Betrachtungen zur wirtschaftlichen Realisierbarkeit einzelner Nutzungskonzepte stellt die Preisentwicklung einzelner Energieträger dar. In Tabelle 32 werden die Entwicklung der Energiekosten für die letzten 10 Jahre sowie prognostische Entwicklungsoptionen einer Verteuerung/Verbilligung um je 30 % dargestellt.

**Tabelle 32: Teuerungsraten der Energiepreise und spezifische Energiepreise netto (Stand Juni 2014)**

| Energieträger | Preisanstieg, in %/a | | | Energiepreise netto, in € pro kWh (Stand Juni 2014) |
|---|---|---|---|---|
| | Vergangene 10 Jahre | Abschwächung um 30% | Anhebung um 30% | |
| **Heizöl** | 8,34 | 5,84 | 10,84 | **0,0661** |
| **Erdgas** | 4,45 | 3,12 | 5,79 | **0,06389** |
| **Steinkohle** | 2 | 1,4 | 2,6 | **0,02658** |
| **Pellets** | 5,09 | 3,56 | 6,62 | **0,05286** |
| **Strom (Dt. Strommix)** | 5,70 | 3,99 | 7,41 | **0,162** |

### 6.3.2 Investitionskosten

Die Investitionskosten für die Herstellung der Wärmequellenanlagen, der Wärmeverteilnetze und der Wärmepumpentechnik sind nachfolgend für den Modellbetrieb B zusammengestellt. Dabei erfolgt generell eine separate Darstellung funktional abgeschlossener Einheiten (z. B. Wärmequelle, Wärmeverteilnetz).

Die geothermischen Wärmequellensysteme sind im Anlagenband (5.2.1) noch einmal detailliert hinsichtlich ihrer technischen Spezifikation und der jeweiligen Kostenanteile zusammengestellt.

In der Tabelle 33 sind die geschätzten Kosten der Wärmeverteilnetze und für die Einbindung der Wärmepumpe dargestellt. Eine Unterscheidung je nach Modellregion ist hier nicht vorhanden, jedoch für die beiden Betriebsvarianten (bivalent parallel und alternativ). Besonders für die parallele Betriebsweise fallen vergleichsweise deutliche Kosten in Höhe von mehr als 1 Mio. Euro an. Unter Beachtung der Betriebsstruktur des Modellbetriebs B und der bereits existierenden Wärmeverteilnetze sind die aufgeführten Maßnahmen für eine geothermische Nutzung jedoch erforderlich, um die technische Nutzbarkeit überhaupt möglich zu machen. Bei Berücksichtigung des bivalent alternativen Betriebs fallen die Kosten mit ca. 45.000 € deutlich geringer aus, weil allein die Einbindung der Wärmepumpentechnik und der Pufferspeicher nebst Zubehör erforderlich sind. Dafür liegt die Lastabdeckung dieser Variante aber nur bei 15 %.

**Tabelle 33: Kostenschätzung Wärmeverteilnetz und Einbindung Wärmepumpe bei unterschiedlichen Betriebsweisen – Modellbetrieb B**

| | Kosten | | Maßnahmen |
|---|---|---|---|
| | **Variante 1** bivalent parallele Betriebsweise | **Variante 2** bivalent alternative Betriebsweise | |
| **Anbindung Wärmepumpe** | | 20.000,00 € | Auftrennen vorhandenes Rohrnetz und Einbindung NT |
| **Pufferspeicher + Zubehör** | 25.000,00 € | 25.000,00 € | - |
| **Heizkreise Niedertemperatur (NT) Heizung** | 45.000,00 € | - | 3 Mischergruppen einschl. Pumpen, Zubehör und Verteilnetz |
| **Alu-Flügelrohr** | 900.000,00 € | - | 2 Flügelrohre übereinander |
| **Lufterhitzer** | 50.000,00 € | - | 10 Lufterhitzer |
| **Summe Investitionskosten, netto** | **1.020.000,00 €** | **45.000,00 €** | |

**Für den Betrieb B ist bei bivalent paralleler Betriebsweise unabhängig vom Betriebsstandort keine geothermische Nutzung möglich.**

Aufgrund der Betriebsgröße/-struktur ist allein für eine reichlich 50%ige Lastabdeckung eine Heizarbeit von 3.128.000 kWh im Jahr erforderlich. Im Vergleich mit dem Betrieb A im ebenfalls bivalent parallelen Betrieb (140 kW Heizleistung) bedeutet dies eine mehr als 6,7-mal höhere Heizlast.

Bezug nehmend auf die Ausführungen unter Kapitel 5.2 werden für den genannten Betrieb im Bereich X (Raum Dresden) bereits 27 Erdwärmesonden à 130 m Endteufe oder sieben Erdwärmesonden à 410 m Tiefe benötigt.
Werden in einer stark vereinfachten (und zu konservativen) Betrachtung die genannten Wärmequellenanlagen um den Faktor der Heizlaststeigerung bei Betrieb B vergrößert (Faktor 6,7), ergäbe sich für den Betrieb B bei bivalent parallelem Betrieb eine Anzahl von 181 Erdwärmesonden à 130 m Endteufe oder 47 Erdwärmesonden à 410 m Tiefe. Aufgrund der steigenden gegenseitigen Beeinflussung der Erdwärmesonden mit zunehmender Anzahl auf begrenztem Areal würde die tatsächlich erforderliche Anzahl der Bohrungen sogar noch deutlich zunehmen.

Bereits ohne weiterführende wirtschaftliche Betrachtungen kann überschlägig (Anhand der Daten von Betrieb A) von Kosten für die Herstellung der **Wärmequellenanlage** in Höhe von mindestens 2 Mio. bzw. mehr als 4 Mio. Euro ausgegangen werden. Zudem sind die verfügbaren Platzverhältnisse für diese Szenarien nicht mehr auskömmlich. Eine ausführliche Berechnung dieser Nutzungsoptionen für den Betrieb B (bivalent paralleler Betrieb) erfolgte daher nicht. Wie in Kapitel 6.2 dargestellt, ist auch die offene Grundwassernutzung über Brunnen nicht möglich, weil es aufgrund der erheblichen Fördermengen zum thermischen Kurzschluss zwischen Förder- und Injektionsbrunnen kommt.

Für die bivalent alternative Betriebsweise sind die Nutzungsoptionen trotz eines geringeren geothermischen Anteils an der Gesamtheizlast (15 %) immer noch stark eingeschränkt. Aufgrund der immer noch sehr hohen geothermisch abzudeckenden Heizarbeit von 862.600 kWh gilt die wirtschaftliche Realisierung beider Sondenoptionen (oberflächennahe, mitteltief) bereits vorab als nicht machbar. Die verfügbaren Platzverhältnisse sind zwar gerade noch ausreichend, würden jedoch eine nahezu komplett flächige Nutzung/Erschließung

nebst dem dazugehörenden, erheblichen Aufwand für die horizontale Anbindung erfordern. Als einzige Option sind daher die geothermischen Brunnenanlagen an den Lockergesteinsstandorten (Raum Dresden/Leipzig) untersucht worden. Die Kosten für die Wärmequellenanlagen sind in Tabelle 34 zusammengestellt. Eine detaillierte Untergliederung enthält der Anlagenband (5.2.1).

Wie zu erkennen ist, unterscheiden sich die Investitionskosten zwischen beiden Standorten nur um ca. 10 %. In den Kosten inbegriffen sind neben den technischen Bauwerken der Brunnen auch die komplette Rohwasseraufbereitung und die Wärmepumpe. Allein die Aufbereitungskosten machen mit jeweils weit mehr als 100.000 € einen sehr deutlichen Anteil an den Gesamtkosten aus.

**Tabelle 34: Kostenschätzung Wärmepumpenanlage inkl. geothermischer Erschließung bei unterschiedlichen Nutzungsvarianten Modellbetrieb B – bivalent alternative Betriebsweise**

| Geothermische Nutzungsvarianten | Kosten Wärmepumpe inkl. geothermische Erschließung (€, netto) | | |
|---|---|---|---|
| | Standorte | | |
| | Raum Dresden/Meißen | Raum Leipzig | Raum Chemnitz |
| | Leistung Wärmepumpe | | |
| | 700 kW | 700 kW | 700 kW |
| **Oberflächennahe Erdwärmesonden** | Nicht wirtschaftlich | | |
| **Mitteltiefe Erdwärmesonden** | Nicht wirtschaftlich | | |
| **Brunnenanlagen** | 505.162 | 552.780 | Technisch nicht ausführbar |

Abschließend sind die gesamten Investitionskosten für den Modellbetrieb B noch einmal zusammenfassend in der Tabelle 35 und in Abbildung 49 zusammengestellt.

Eine geothermische Nutzung ist somit allein für die Regionen mit Lockergesteinsbedeckung und bei bivalent alternativem Betrieb mit vergleichsweise geringer Lastabdeckung möglich. Die Gesamtkosten liegen jeweils bei 550.000 bzw. knapp 600.000 €. Dabei entfallen die Kosten jeweils zu mehr als 90 % auf die Wärmequellenanlage. Für die Verteilung fallen geringere Kosten an.

Grundsätzlich sind in der Kostenschätzung keine Planungskosten der Wärmequellenanlage enthalten. Diese ergeben sich jeweils nach HOAI (aktueller Stand), Teil 3 (Objektplanung), Abschnitt 3 (Ingenieurbauwerke), § 43 (Leistungsbild Ingenieurbauwerke). Je nach konkretem Planungsanspruch sind voraussichtlich die Honorarzonen II bzw. III maßgebend.

Für den Betrieb ist mit einer staatlichen Förderung zu rechnen. Die zu erwartenden Förderbeträge sind im nachfolgenden Kapitel aufgeführt. Aus Gründen der Planungssicherheit ist die zu erwartende staatliche Förderung nicht in die Berechnung der Investitionskosten einbezogen worden. In den Darstellungen der geschätzten Investitionskosten (Tabelle 35 und Abbildung 49) sind die Fördersätze somit ebenfalls nicht enthalten.

**Tabelle 35: Gesamt Investitionskosten – Modellbetrieb B**

| Investitionskosten, gesamt (netto, in €) | | Geothermische Nutzungsvariante | | |
|---|---|---|---|---|
| | | Oberflächennahe Erdwärmesonden | Mitteltiefe Erdwärmesonden | Brunnenanlagen |
| Region X (Raum Dresden) | parallel | - | - | - |
| | alternativ | - | - | 550.162 |
| Region Y (Raum Leipzig) | parallel | - | - | - |
| | alternativ | - | - | 597.780 |
| Region Z (Raum Chemnitz) | parallel | - | - | - |
| | alternativ | - | - | - |

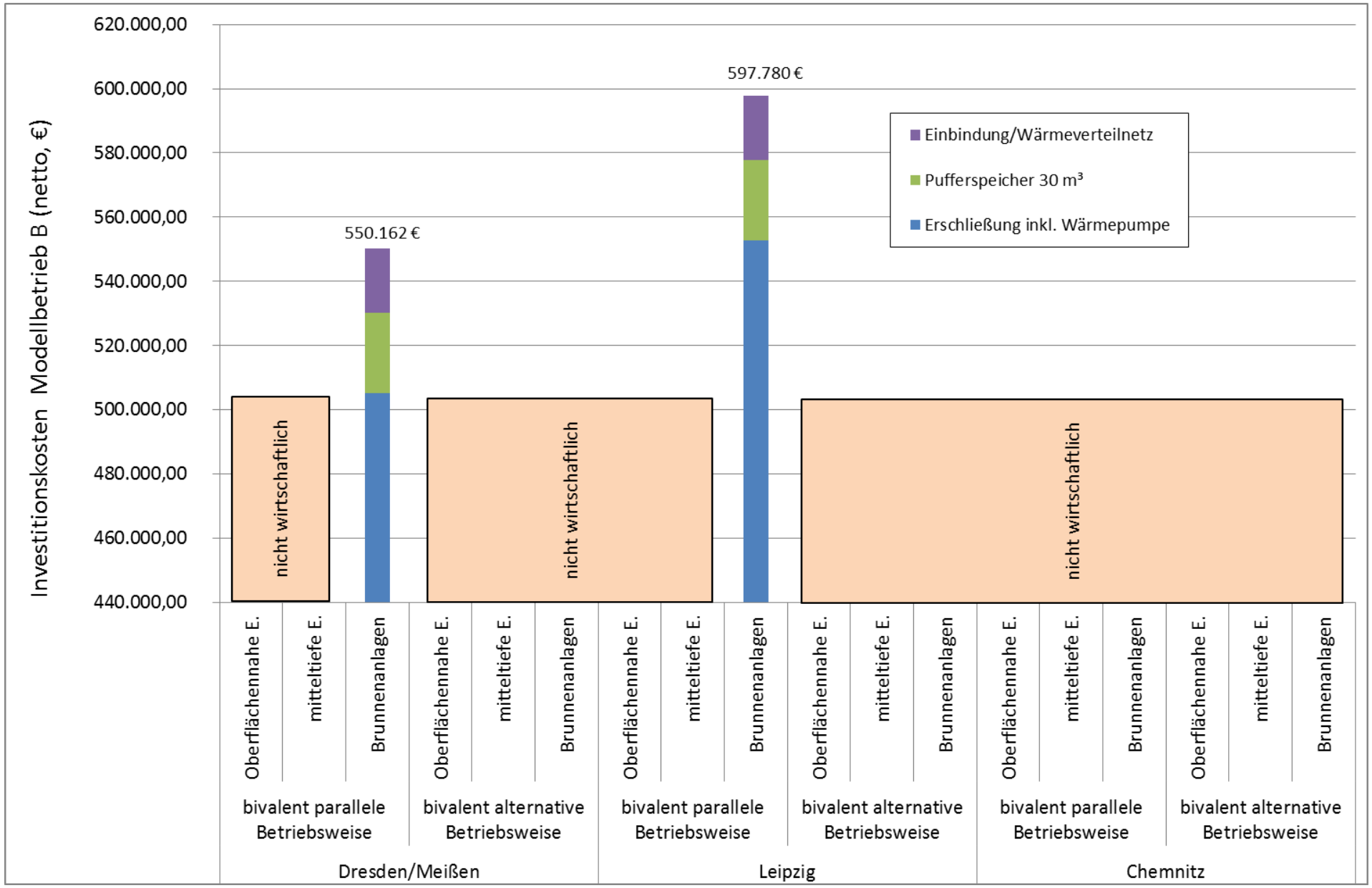



**Abbildung 49: Übersicht der Investitionskosten bei den unterschiedlichen geothermischen Nutzungsvarianten – Modellbetrieb B**

### 6.3.3 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung Modellbetrieb B

Die zusammenfassenden Betrachtungen zur Wirtschaftlichkeit der geothermischen Systeme (allein die Brunnenanlagen in den Regionen X und Y bei bivalent paralleler Betriebsweise) sind im Anlagenband (5.2.2) zusammengestellt.

Wie zu erkennen ist, kann bei Bestandsanlagen auf der Basis von Erdgas, Steinkohle oder Pellets keine wirtschaftliche Realisierbarkeit der geothermischen Systeme in Aussicht gestellt werden. Im Vergleich mit dem günstigsten konventionellen System (Steinkohle) fallen die jährlichen Heizkosten bei der Betrachtung der geothermischen Brunnensysteme fast doppelt so hoch aus.

Lediglich bei Bestandsanlagen, die mit Heizöl beheizt werden, ist die Einbeziehung der Wärmepumpensysteme wirtschaftlich denkbar. Die jährlichen Heizkosten des bivalenten Systems aus Heizöl (Spitzenlast) und geothermischer Brunnenanlage (Grundlast) liegen für alle drei Szenarien der Preisentwicklung (Tabelle 32) der Brennstoffe (Heizöl, Strom) unter denen bei alleiniger Nutzung von Heizöl.

Hinsichtlich der Amortisationszeit sind die Kosten zur Herstellung der geothermischen Brunnenanlagen mit den jährlichen Kosteneinsparungen im bivalenten Betrieb ins Verhältnis gesetzt worden. Für Y ergibt sich eine Amortisierung des Wärmepumpenbetriebs binnen weniger als 15 Jahren nur dann, wenn der Preisanstieg der Energieträger so bleibt wie in den letzten Jahren oder 30 % höher ausfällt. Bei einer Abschwächung des Preisanstiegs erfolgt die Amortisierung erst nach mehr als 15 Jahren. In der Region X erfolgt die Amortisierung für alle drei Szenarien der Preisentwicklung binnen 15 Jahren. Die längste Zeitdauer (14,6 Jahre) tritt jedoch auch hier auf, wenn sich der Preisanstieg um 30 % verringert. Im Vergleich mit allen anderen konventionellen Energieträgern ist keine Wirtschaftlichkeit darzustellen.

Die Wärmegestehungskosten des bivalenten Systems Heizöl/Wärmepumpe liegen z. B. bei gleichbleibender Entwicklung der Energiekosten für beide Modellregionen bei 0,14 €/kWh. Bei alleiniger Nutzung von Heizöl bei 0,15 €/kWh.

## 6.4 Fördermöglichkeiten

### 6.4.1 Staatliche Förderung

Bei Modellstandort B handelt es sich um ein bestehendes Gebäude. Unter der Voraussetzung, dass vor dem 01.01.2009 der Bauantrag gestellt wurde und vor diesem Datum bereits ein Heizungssystem installiert war, ist eine Förderung der Wärmepumpenanlage über das Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) möglich. Diese gilt jedoch nur bis zu einer Heizleistung der Wärmepumpe von maximal 100 kW. Anlagen mit größerer Leistung werden hier nicht gefördert. **Eine BAFA-Förderung ist somit für die Modellbetriebe B nicht möglich (Heizleistung 140 kW).**

Das KfW-Programm Erneuerbare Energien „Premium“ fördert unter Punkt 5 „große Wärmespeicher“ mit mehr als 10 m³ Speichervolumen, unter Punkt 7 „große effiziente Wärmepumpen“ mit einer installierten Nennwärmeleistung von mehr als 100 kW und unter Punkt 8 Anlagen zur Erschließung und Nutzung von Tiefengeothermie.

Die Förderung großer Wärmespeicher beinhaltet einen Tilgungszuschuss von 250 € je Kubikmeter Speichervolumen. Als Bedingung gilt jedoch, dass das Temperaturniveau der dem Speicher entnommenen Wärme ausreicht, um die Wärmelast direkt und ohne weitere Maßnahmen zur Temperaturerhöhung zu decken. Für

den Modellbetrieb B ist dies nicht der Fall, weil zumindest zeitweilig eine Temperaturerhöhung durch ein zweites Heizsystem erforderlich ist. **Der einzubauende Pufferspeicher ist somit nicht förderfähig.**

Die geplante Wärmepumpe mit einer Heizleistung von 700 kW liegt weit über der Mindestleistung von 100 kW und ist somit generell förderfähig. Als eine technische Voraussetzung ist der Nachweis einer Jahresarbeitszahl von wenigstens 3,8 gefordert. Eine Jahresarbeitszahl in dieser Höhe wird für den Betrieb B erwartet. Es besteht somit die Fördermöglichkeit über das genannte KfW-Programm in Form eines Tilgungszuschusses in Höhe von 80 € je kW Wärmeleistung, jedoch nur bis zu einer Maximalförderung von 50.000. **Es ist somit eine Förderung in Höhe der Maximalförderung (50.000 €) zu erwarten.**

Die KfW-Förderung für Tiefengeothermie ab 400 m Bohrtiefe ist nicht anwendbar (siehe Ausführungen unter Betrieb A).

Für den Modellbetrieb B ist somit eine staatliche Förderung in Höhe von 50.000 € realistisch.

### 6.4.2 Sonstige Förderung

Neben der staatlichen Förderung besteht eine weitere, „indirekte“ Förderung in der Bezugsmöglichkeit vergünstigter Strompreise der Energieversorger. Hier sind zur Berechnung die Tarife der Envia Mitteldeutsche Energie AG angesetzt worden (Wärmepumpentarif und „normaler Tarif Ökostrom):

- Wärmepumpentarif Envia M: 16,2 Cent/kWh (netto)
- Tarif Profistrom 24 h (100 % Ökostrom): 19,0 Cent/kWh (netto)

## 6.5 Fazit Modellbetrieb B

Für den Modellbetrieb B konnte ein Gesamtenergiebedarf in Höhe von 5.900 kW (bzw. ca. 5,4 Mio. kWh pro Jahr) ausgewiesen werden. Grundsätzlich ist nur ein bivalenter Betrieb möglich, wobei in der ersten Variante der bivalent parallele Betrieb berücksichtigt wurde, in der zweiten Variante der bivalent alternative. Die Heizleistung der Wärmepumpe liegt jeweils bei 700 kW, wobei beim bivalent parallelen Betrieb ca. 55 % der Heizarbeit abgedeckt werden, bei alternativem Betrieb lediglich ca. 15 %.

Wie bereits beim Modellbetrieb A wurden auch für den Modellbetrieb B alle drei Standorte hinsichtlich der Realisierbarkeit der drei Wärmequellensysteme untersucht (oberflächennahe und mitteltiefe Erdwärmesonden, Brunnenanlagen). Aufgrund der Größe des Betriebs, der energetischen Anforderungen und der baulichen Ausführung ist die Nutzung oberflächennaher und mitteltiefer Erdwärmesonden an keinem Standort möglich. Ursächlich dafür sind die erheblichen Investitionskosten und die nicht durchweg ausreichenden Platzverhältnisse für die Errichtung der Anlagen.

Weil in der Modellregion Z aufgrund der geologisch/hydrogeologischen Verhältnisse keine Brunnenanlagen möglich sind, ist für diese Betriebsstruktur in der genannten Region keine Geothermienutzung möglich.

Für die Lockergesteinsbereiche (Modellregion X und Y) sind bei der größeren Lastvariante des bivalent parallelen Betriebs ebenfalls keine Brunnenanlagen möglich. Aufgrund der notwendigen Fördermengen entsteht selbst bei großzügiger Planung der Brunnenanlage rasch ein hydraulischer Kurzschluss (die Förderbrunnen ziehen das abgekühlte Wasser aus den Injektionsbrunnen entgegen der natürlichen Grundwasserströmung wieder an). Lediglich für die bivalent alternative Betriebsweise (15 % Lastabdeckung) ist die offene Grund-

wassernutzung über Brunnen als alleinige geothermische Erschließungsoption für den Modellbetrieb B möglich. Die Kosten dafür liegen je nach Standort zwischen ca. 550.000 bis 600.000 €.

Aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten kann bei Bestandsanlagen auf der Basis von Erdgas, Steinkohle oder Pellets keine Kosteneinsparung durch ein bivalentes System unter Einbeziehung der geothermischen Brunnenanlagen in Aussicht gestellt werden. Lediglich bei Bestandsanlagen, die mit Heizöl beheizt werden, ist die Einbeziehung der Wärmepumpensysteme wirtschaftlich denkbar. Dies gilt jedoch nur, wenn die Preissteigerung der Energieträger analog der letzten Jahre verläuft bzw. weiter ansteigt. Dann sind Amortisationszeiten zwischen etwa 7 und 12 Jahren realistisch. Im Fall einer Abschwächung des Preisanstiegs gibt es praktisch keine wirtschaftliche Nutzbarkeit.

Die Wärmegestehungskosten des bivalenten Systems Heizöl/Wärmepumpe liegen z. B. bei gleichbleibender Entwicklung der Energiekosten für beide Modellregionen bei 0,14 €/kWh. Bei alleiniger Nutzung von Heizöl bei 0,15 €/kWh.

# 7 Modellbetrieb C

## 7.1 Betriebsplanung, Energiebedarfsberechnung und $CO_2$-Bilanz

Bei Modellbetrieb C handelt es sich um einen energieoptimierten Gewächshausneubau, welcher als Einzelhandelsgärtnerei genutzt werden soll. Hierbei werden nahezu die gleichen Kulturen mit den dazugehörigen Temperaturprogrammen des Modellbetriebs A übernommen (siehe Kapitel 2.1 und 5.1 sowie Anlagenband [1.1]). Das Gewächshaus setzt sich aus vier Produktionsabteilen (insgesamt 1.612,8 m²), einem Arbeitsverbinder (307,2 m²) und einem angeschlossenen Verkaufsgewächshaus (384 m²) zusammen, in welchem zusätzlich ein Lager, ein Heizraum sowie die Sozial- und Sanitärbereiche (insgesamt 153,6 m²) integriert sind (siehe Abbildung 50). Das konzipierte Gewächshaus in Venlo-Blockbauweise (Firstrichtung Ost-West) weist eine Bruttogrundfläche von 2.457,6 m² auf.

Grundsätzlich erfolgte eine sehr detaillierte Konzeption des Gewächshausneubaus, bei der einerseits die Ansprüche an ein hochgedämmtes, modernes Gewächshaus (in Anlehnung an die Inhalte und Anregungen des ZINEG-Projektes) berücksichtigt wurden, zum anderen jedoch auch die wirtschaftliche Machbarkeit (Finanzierbarkeit unter ökonomischen Gesichtspunkten) beachtet werden musste.

Wie in den Tabellen 10 und 11 des Anlagenbandes (1.3) zu sehen ist, wurden für die Eindeckung der Außenstehwände und Außengiebel jeweils hochwärmedämmende Stegvierfachplatten (S4P) verwendet. Gegenüber herkömmlichen, einfachverglasten Gewächshäusern besteht hier eine deutlich höhere Wärmedämmung im Bereich von etwa 60 %. Die Dacheindeckung ist im Rahmen der Planungen mit Stegdoppelplatten erfolgt. Auch hier ist gegenüber der Einfachverglasung mit einer deutlichen Energieeinsparung zu rechnen (ca. 40 %). Neben der genannten Energieeinsparung zeichnen sich die Materialien auch durch eine ausgesprochene Langlebigkeit aus, sodass Wartungs- und Reparaturkosten gegenüber anderen (meist preiswerteren Materialien) auf eine Minimum reduziert werden können.

Alle Produktionsabteilungen und die Verkaufsabteilung sind mit Energieschirmen konzipiert (meist mehrlagig), um die Wärmeverluste weiter zu minimieren. Die Anschlüsse zu den Stehwandelementen sind durchweg dicht konzipiert. Auch hier sollen somit Wärmeverluste unterbunden werden. Das Gewächshaus verfügt mehrheitlich über eine Fußbodenheizung, um die nötigen Vorlauftemperaturen so gering wie möglich zu halten und diese über eine möglichst große Fläche abzugeben.

Im Ergebnis dieser energetischen Optimierung liegt der jährliche Wärmebedarf des geplanten Gewächshausneubaus bei ca. 238.000 kWh (Heizleistung 240 kW). Auch wenn ein direkter Vergleich mit dem Modellbetrieb A (analoges Anbauspektrum) nicht ohne Einschränkungen möglich ist, so liegt der Wärmebedarf dort bei ca. 530.000 kWh (Heizleistung 470 kW) und ist somit mehr als doppelt so hoch wie bei dem energetisch optimierten Neubau.

Eine detaillierte Beschreibung des Gewächshauses für Modellbetrieb C einschließlich der technischen Ausstattung ist im Anlagenband (1.3) zusammengestellt.

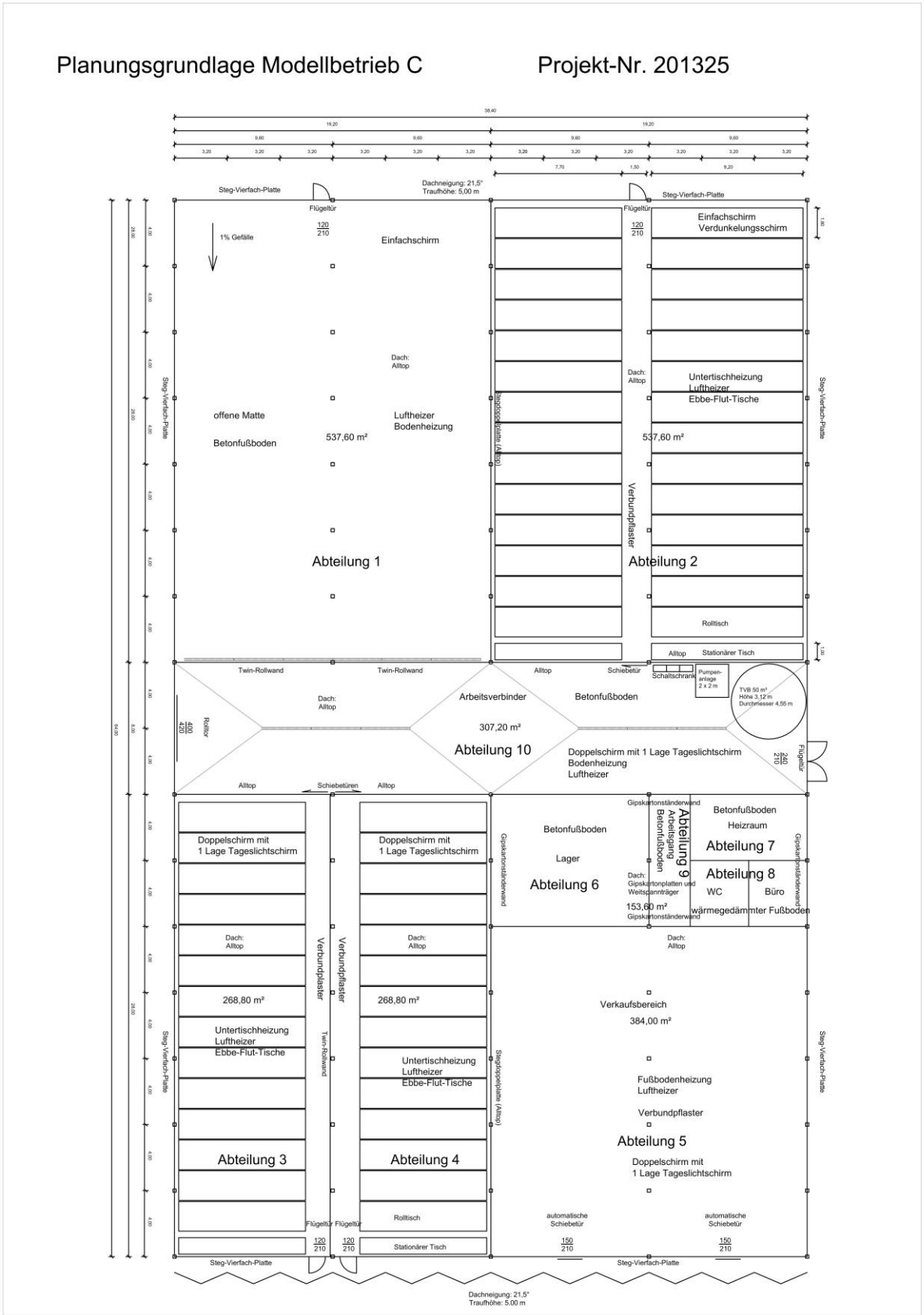



**Abbildung 50: Modellbetrieb C – Anlagenplanung**

Die Berechnungen zur Ermittlung der notwendigen Wärmeleistung und des Heizenergieverbrauchs wurden wie bei allen anderen Musterbetrieben mit dem Simulationsprogramm HORTEX 4.1 durchgeführt. Die Ergebnisse der Simulationsrechnungen basieren auf den konstruktiven und technischen Daten der geplanten Gewächshausanlage, der für die gärtnerische Produktion notwendigen Innentemperaturen und der Normaußentemperatur für den Standort der Gärtnerei (DIN 4701 bzw. EN 12831) im Testreferenzjahr (Jahresklimadatensatz GLOTESI).

Die für die Simulationsrechnung zugrunde gelegten Temperaturprogramme sind im Anlagenband (1.3) zusammengestellt. Unter Berücksichtigung einer Normaußentemperatur am Standort der Gärtnerei von -14 °C (nach DIN 4701), Auslegungstemperaturen in den Gewächshauskabinen zwischen 3 und 20 °C, errechnet sich unter Berücksichtigung der Temperaturprogramme eine notwendige Gesamtheizleistung für den Betrieb von **240 kW** (Tabelle 36). Die Ergebnisse aller Simulationsrechnungen sind im Anlagenband (6.2) ersichtlich.

**Tabelle 36: Ergebnisse der Simulationsberechnungen für den Modellbetrieb C**

| | Auslegungsleistung (kW) | Heizleistung im Abtaufall (kW) | Heizenergieverbrauch (kWh) | Heizenergieverbrauch (kWh pro m² und Jahr) |
|---|---|---|---|---|
| **Abteilung 1** | 31 | | 17.154 | 32 |
| **Abteilung 2** | 70 | | 100.227 | 186 |
| **Abteilung 3** | 26 | | 13.088 | 49 |
| **Abteilung 4** | 14 | | 6.583 | 25 |
| **Abteilung 5** | 47 | | 68.326 | 178 |
| **Abteilung 6** | 5 | | 2.652 | 35 |
| **Abteilung 7** | 2 | | 1.003 | 35 |
| **Abteilung 8** | 3 | | 11.563 | 407 |
| **Abteilung 9** | 2 | | 302 | 15 |
| **Abteilung 10** | 22 | | 17.157 | 56 |
| **Gesamt** | **240** | **330** | **238.057** | **97** |

In der Abbildung 51 ist die benötigte Heizleistung in kW pro Stunde und Tag für den Modellbetrieb C dargestellt. Der Bereich unterhalb der roten bzw. grünen Linie kennzeichnet den Bereich, welcher von der Wärmepumpe (Grundlast) mit einer Leistung von 70 kW (Variante I) bzw. 30 kW (Variante II) abgedeckt wird.

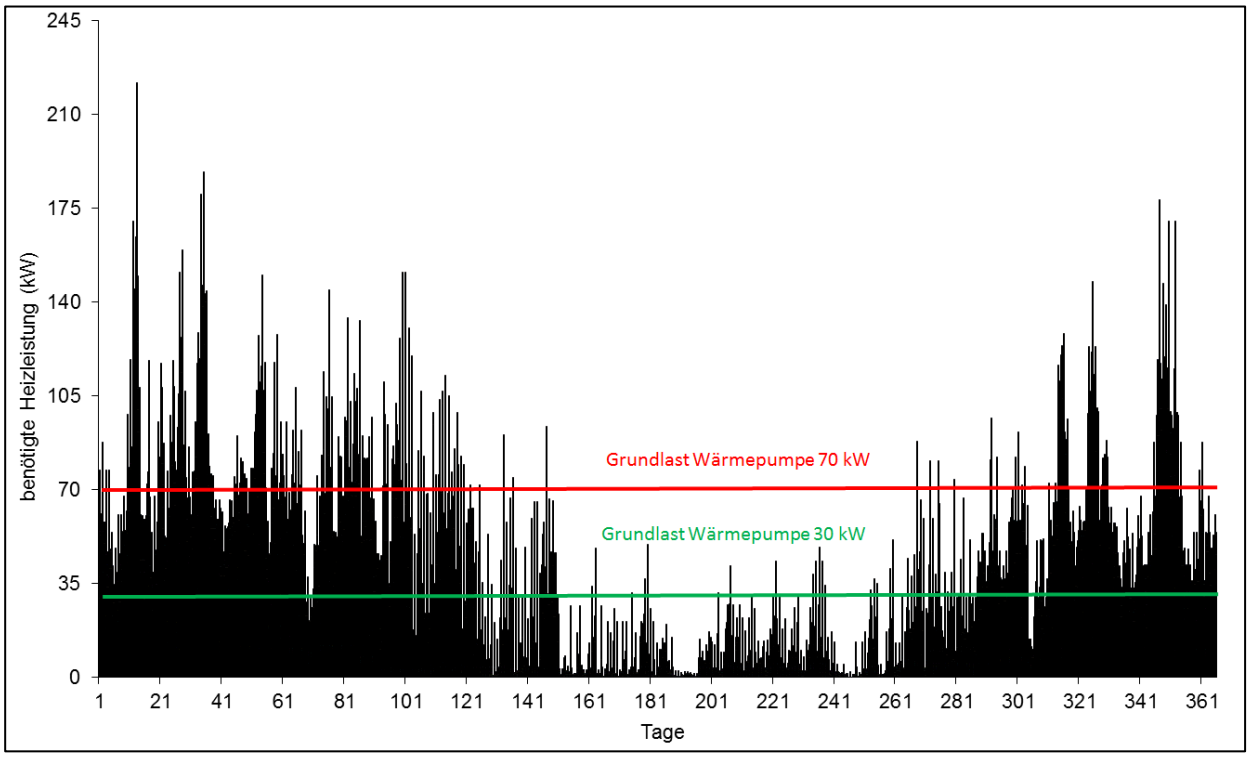



**Abbildung 51: Stündlich benötigte Heizleistung – Modellbetrieb C**

Abbildung 52 zeigt den Anteil der Jahresheizarbeit bei verschiedenen Heizleistungen der Wärmepumpe bei bivalent paralleler Betriebsweise. Für den Betrieb C wird allein dieses Szenario, allerdings mit zwei verschiedenen Heizleistungen der Wärmepumpe berücksichtigt. Wie zu erkennen ist, liegt die Lastabdeckung bei der 30 kW-Wärmepumpe bei ca. 59 % der Jahresheizarbeit, bei der 70 kW-Wärmepumpe bei ca. 91 %.

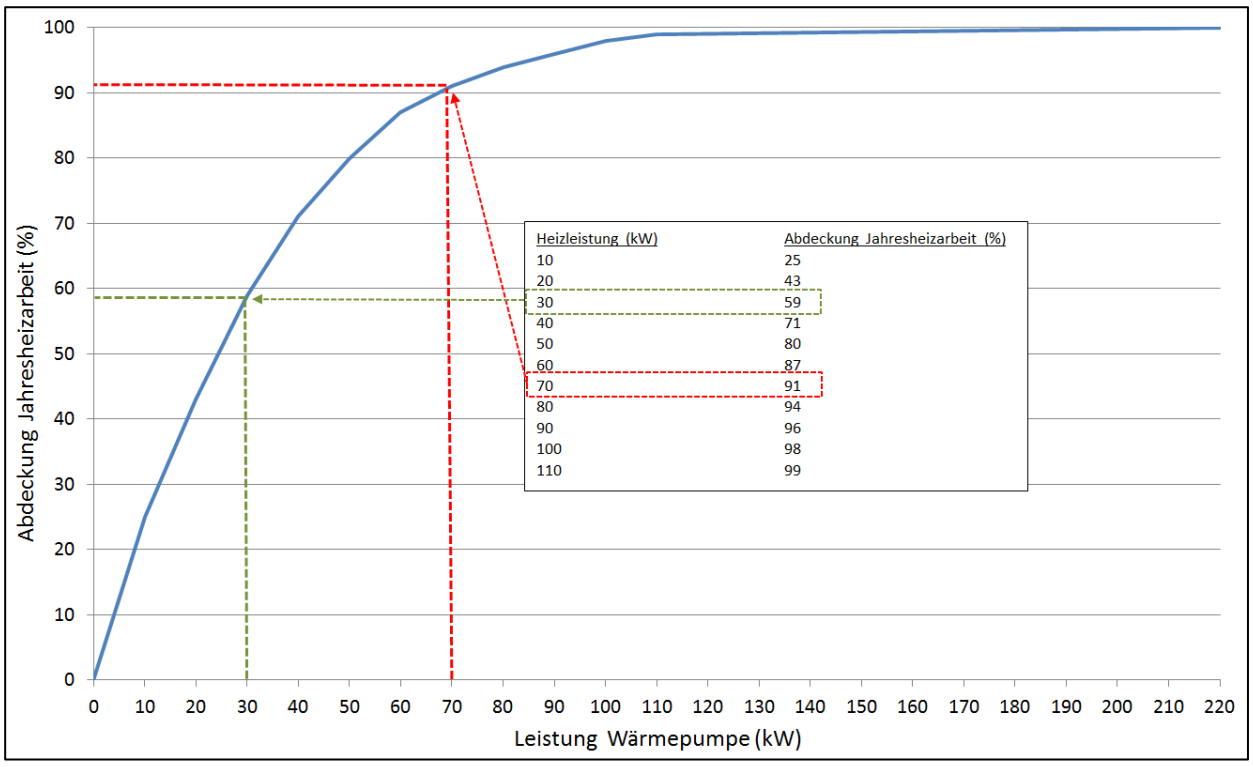



**Abbildung 52: Modellbetrieb C – Heizleistung und Lastabdeckung für verschiedene Wärmepumpen im bivalent parallelen Betrieb**

Der Modellbetrieb C ist der einzige betrachtete Betriebstyp mit einem umfassenden Flächenheizsystem – einer Fußbodenheizung. Daher kann allein bei diesem Betrieb die Möglichkeit der saisonalen Wärmespeicherung im Untergrund (sommerlicher Energieeintrag) berücksichtigt werden. Bei allen anderen Betrieben sind die erforderlichen Wärmeübertragungsflächen nicht im erforderlichen Umfang vorhanden. Der sommerliche Energieeintrag bei Modellbetrieb C ist dabei nicht primär als „Kühlung" zu deklarieren (eine effektiv merkliche, passive Kühlung der Gewächshäuser wird besonders im Sommer kaum erreichbar sein), sondern als „zusätzliche Untergrundregenerierung", um Bohrmeter und damit Investitionskosten einzusparen. Generell soll allein passiv über die ohnehin mit Fußbodenheizung ausgerüsteten Flächen gekühlt werden. Somit fällt praktisch kein signifikanter, zusätzlicher Investitionsaufwand an.

Für die Ermittlung der erreichbaren Kühlleistung sind Erfahrungs-/Praxiswerte, versehen mit einem Sicherheitsabschlag angesetzt worden. So sind selbst im Bürobereich 45 W/m² ohne weiteres realisierbar. Bei direkter Sonneneinstrahlung auf den Boden können bis zu 210 W/m² abgeführt werden (Bezug: Uponor Sonderdruck zu den Fluggastfingern im Flughafen Bangkok – dort wurde trotz Verschattung mit 70 bis 80 W/m² gerechnet).

Für den Modellbetrieb C wird daher die abdeckbare Kühlleistung mit 60 W/m² angesetzt (sehr konservative Herangehensweise). Bei einer Fläche der Fußbodenheizung von ca. 1.200 m² ergibt sich die passive Kühlleistung mit 73,7 kW.

Für die Laufzeitstunden sind die Sonnenscheinstunden für die Wetterstationen Chemnitz, Dresden und Leipzig verwendet worden und dort für die Monate Mai bis September pauschal 2/3 der Sonnenstunden (Reihe 1981 bis 2010) als reale Kühlstunden angesetzt. Damit können mindestens folgende Kühlpotenziale abgeführt werden:

- Region X und Y: 49.305 kWh
- Region Z: 48.200 kWh

Die Lastverteilung der Kühlung entspricht der monatlichen Verteilung der Sonnenstunden.

### Bivalent paralleler Betrieb

Für den bivalent parallelen Betrieb liegt die Lastabdeckung an der Gesamtheizarbeit bei ca. 55 % und ist damit deutlich höher als beim alternativen Betrieb.

In der folgenden Abbildung 53 ist die Jahresdauerlinie für den Modellbetrieb C im bivalent parallelen Betrieb mit einer 30 kW-Wärmepumpe dargestellt. Die grün hinterlegte Fläche stellt dabei die geothermische Grundlastabdeckung dar. Die darüberliegende Fläche repräsentiert den Spitzenlastbereich, der konventionell abgedeckt werden muss. Hierfür wird ein 240 kW-Spitzenlastkessel angesetzt.

Unter Beachtung der berechneten Lastprofile (Stundenschritte – siehe Anlagenband [3.3]) ergibt sich für die **30 kW-Wärmepumpe** eine geothermisch zu erbringende **Heizarbeit von ca. 139.211 kWh im Jahr.**

Abbildung 54 zeigt die Jahresdauerlinie für den Modellbetrieb C im bivalent parallelen Betrieb mit einer **70 kW-Wärmepumpe.** Die grün hinterlegte Fläche stellt dabei auch hier die geothermische Grundlastabdeckung dar. Die darüberliegende Fläche repräsentiert den Spitzenlastbereich, der konventionell abgedeckt werden muss. Hierfür wird ein 200 kW-Spitzenlastkessel angesetzt.

Unter Beachtung der berechneten Lastprofile (Stundenschritte – siehe Anlagenband [3.3]) ergibt sich für die 70 kW-Wärmepumpe eine geothermisch zu erbringende **Heizarbeit von ca. 217.116 kWh im Jahr.**

Ein vereinfachtes Anlagenschema ist in der Abbildung 55 dargestellt. Hierbei ist zu betonen, dass die Auswahl und Positionierung der Soleumwälzpumpen jeweils für den Einzelfall individuell angepasst werden muss.

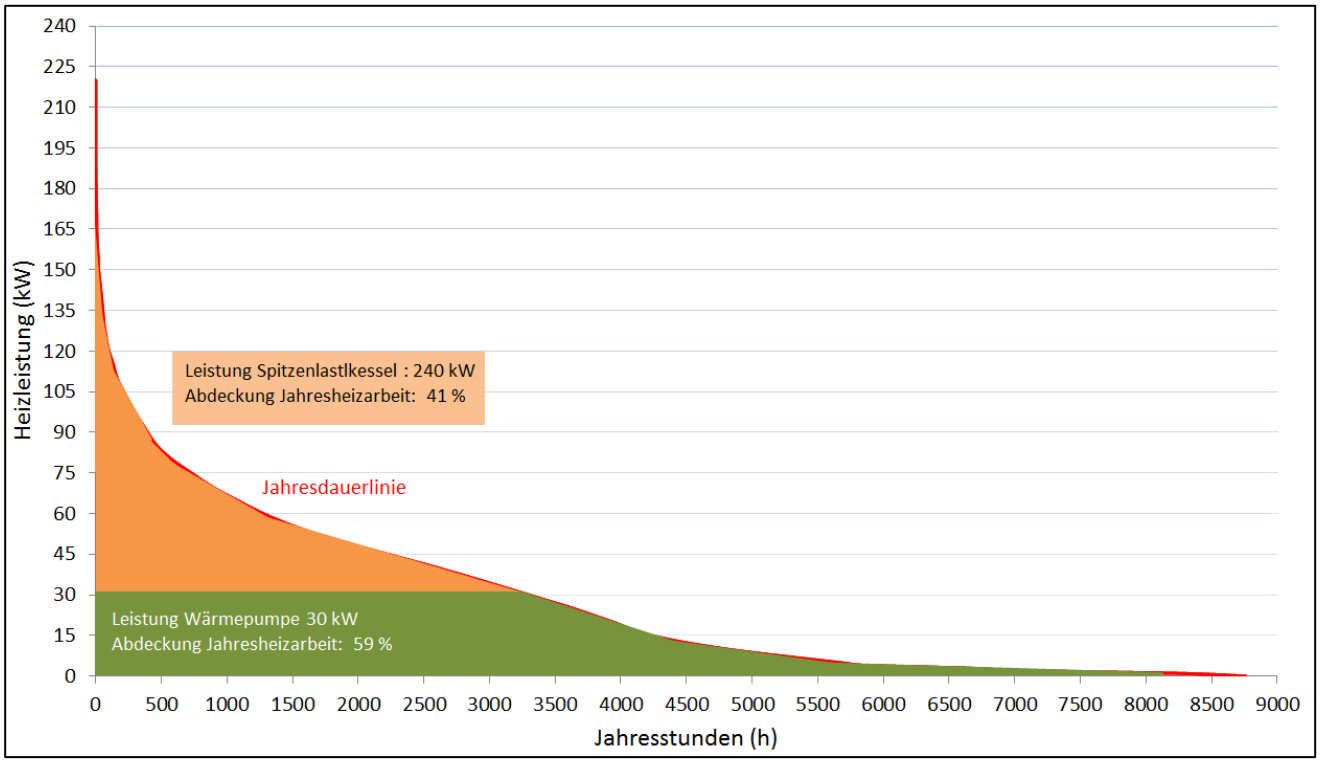



**Abbildung 53: Jahresdauerlinie mit Darstellung der Lastabdeckung (Betrieb C, 30 kW-Wärmepumpe)**

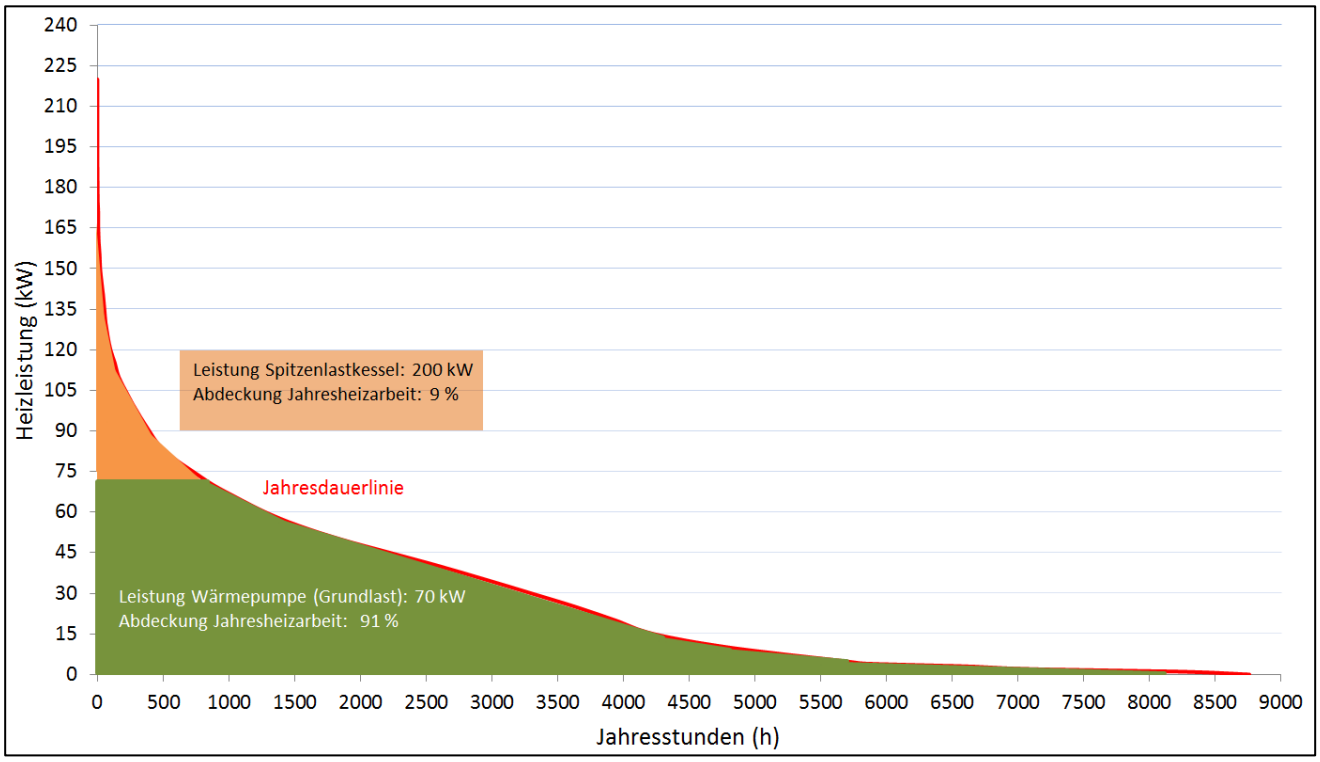



**Abbildung 54: Jahresdauerlinie mit Darstellung der Lastabdeckung (Betrieb C, 70 kW-Wärmepumpe)**

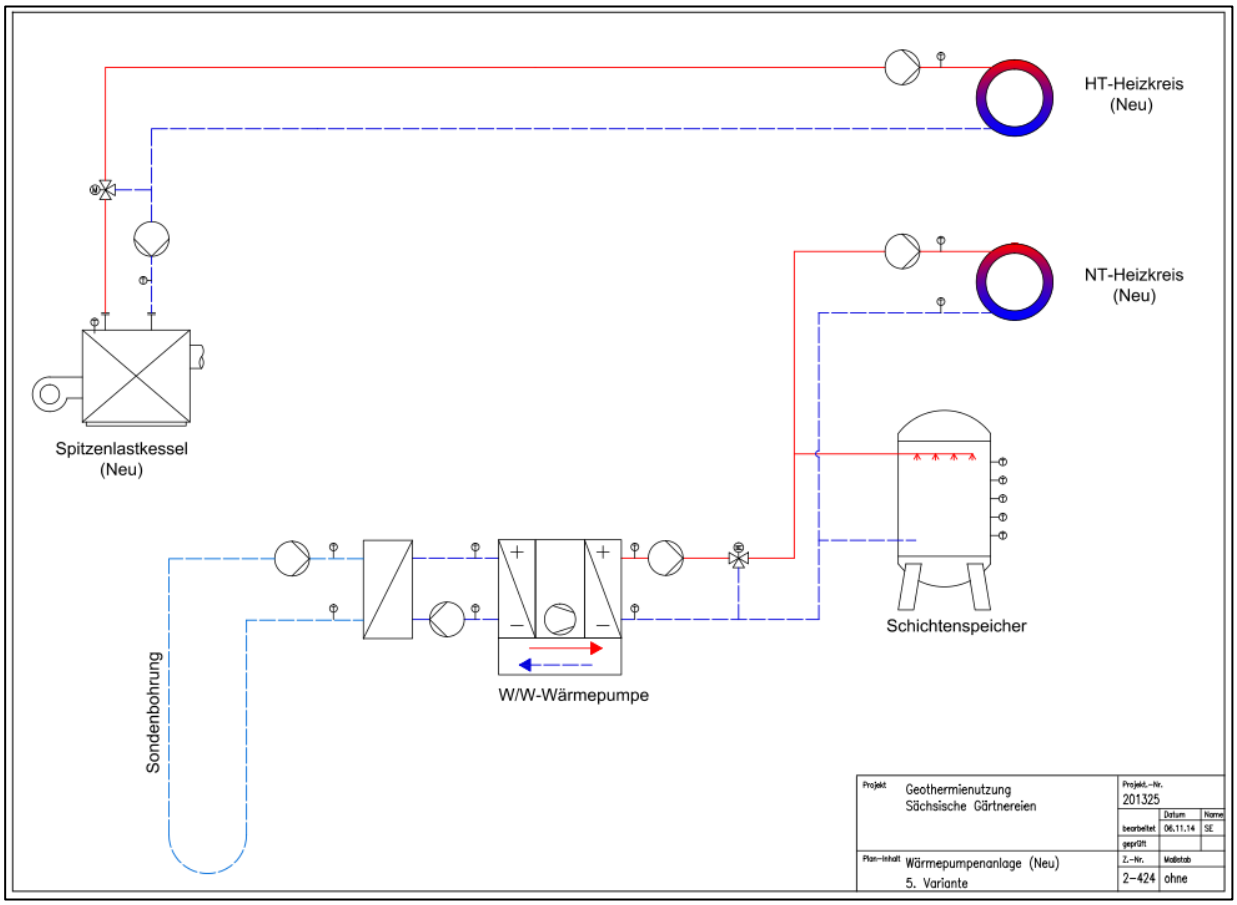



**Abbildung 55: Heizungsschema (bivalent parallel) für die Integrierung einer Wärmepumpe in das Heizungssystem – Modellbetrieb C**

Vor dem Hintergrund der Vergleichbarkeit verschiedener Wärmeversorgungssysteme wurden neben dem Wärmepumpenbetrieb auch konventionelle Versorgungsmöglichkeiten betrachtet. Die folgende Tabelle 37 gibt einen Überblick über die dabei betrachteten Versorgungskonzepte. In der Tabelle 38 sind die Ergebnisse der für das jeweilige System erfolgten Kesseldimensionierung enthalten.

**Tabelle 37: Untersuchte Wärmeversorgungskonzepte für den Modellbetrieb C**

| Variante | Leistungsaufteilung | | Wärmebedarfsdeckung | |
|---|---|---|---|---|
| | Grundlast (%) | Spitzenlast (%) | Grundlast (%) | Spitzenlast (%) |
| Heizöl | 100 | 0 | 100 | 0 |
| Erdgas | 100 | 0 | 100 | 0 |
| Steinkohle | 100 | 0 | 100 | 0 |
| Pellets | 100 | 0 | 100 | 0 |
| Elektro-Wärmepumpe 30 kW + Heizöl | 12 | 88 | 60 | 40 |
| Elektro-Wärmepumpe 70 kW + Heizöl | 30 | 70 | 90 | 10 |
| Elektro-Wärmepumpe 30 kW + Erdgas | 12 | 88 | 60 | 40 |
| Elektro-Wärmepumpe 70 kW + Erdgas | 30 | 70 | 90 | 10 |

**Tabelle 38: Kesseldimensionierung für den Modellbetrieb C**

| Variante | Leistungsaufteilung | |
|---|---|---|
| | Grundlast (kW) | Spitzenlast (kW) |
| Heizöl | | 270 |
| Erdgas | | 270 |
| Steinkohle | | 270 |
| Pellets | | 270 |
| Elektro-Wärmepumpe 70 kW + Heizöl | 70 | 200 |
| Elektro-Wärmepumpe 70 kW + Erdgas | 70 | 200 |
| Elektro-Wärmepumpe 30 kW + Heizöl | 30 | 240 |
| Elektro-Wärmepumpe 30 kW + Erdgas | 30 | 240 |

Die **$CO_2$-Bilanz** für die betrachteten Wärmeversorgungskonzepte ist in der nachfolgenden Tabelle und in Abbildung 56 zusammengefasst. Wie zu erkennen ist, liegt der $CO_2$-Ausstoß der geothermischen Nutzungskonzepte erwartungsgemäß durchweg deutlich unter dem bei ausschließlicher Nutzung fossiler Energieträger. Ein ähnlich niedriges Niveau besitzen nur die Nutzungskonzepte unter Einbeziehung von Pellets.

**Tabelle 39: Wärmebedarf und $CO_2$-Emissionen – Modellbetrieb C**

| Energieträger | $CO_2$-Äquivalent inkl. Vorketten nach GEMIS 4.8, in kg pro kWh |
|---|---|
| Heizöl | 0,302 |
| Erdgas | 0,224 |
| Steinkohle | 0,438 |
| Pellets | 0,041 |
| Deutscher Strommix | 0,633 |
| Ökostrom | 0,04 |

| Energievarianten | Energieverbrauch | Stromverbrauch, in kWh | $CO_2$-Ausstoß, in t pro a (Ökostromnutzung) | $CO_2$-Ausstoß, in t pro a (Nutzung Deutscher Strommix) |
|---|---|---|---|---|
| Heizöl | 26.293 l/a | 5.026 | 80 | 83 |
| Erdgas | 27.843 m³/a | 5.026 | 65 | 68 |
| Steinkohle | 32.841 kg/a | 11.090 | 128 | 134 |
| Pellets | 58.780 kg/a | 11.197 | 12 | 19 |
| 30 kW Elektro-Wärmepumpe (JAZ 3,8) + Heizöl | 10.917 l/a | 45.895 | 35 | 62 |
| 70 kW Elektro-Wärmepumpe (JAZ 3,8) + Heizöl | 2.313 l/a | 67.868 | 10 | 50 |
| 30 kW Elektro-Wärmepumpe (JAZ 3,8) + Erdgas | 11.561 m³/a | 45.895 | 29 | 56 |
| 70 kW Elektro-Wärmepumpe (JAZ 3,8) + Erdgas | 2.449 m³/a | 67.868 | 8 | 49 |

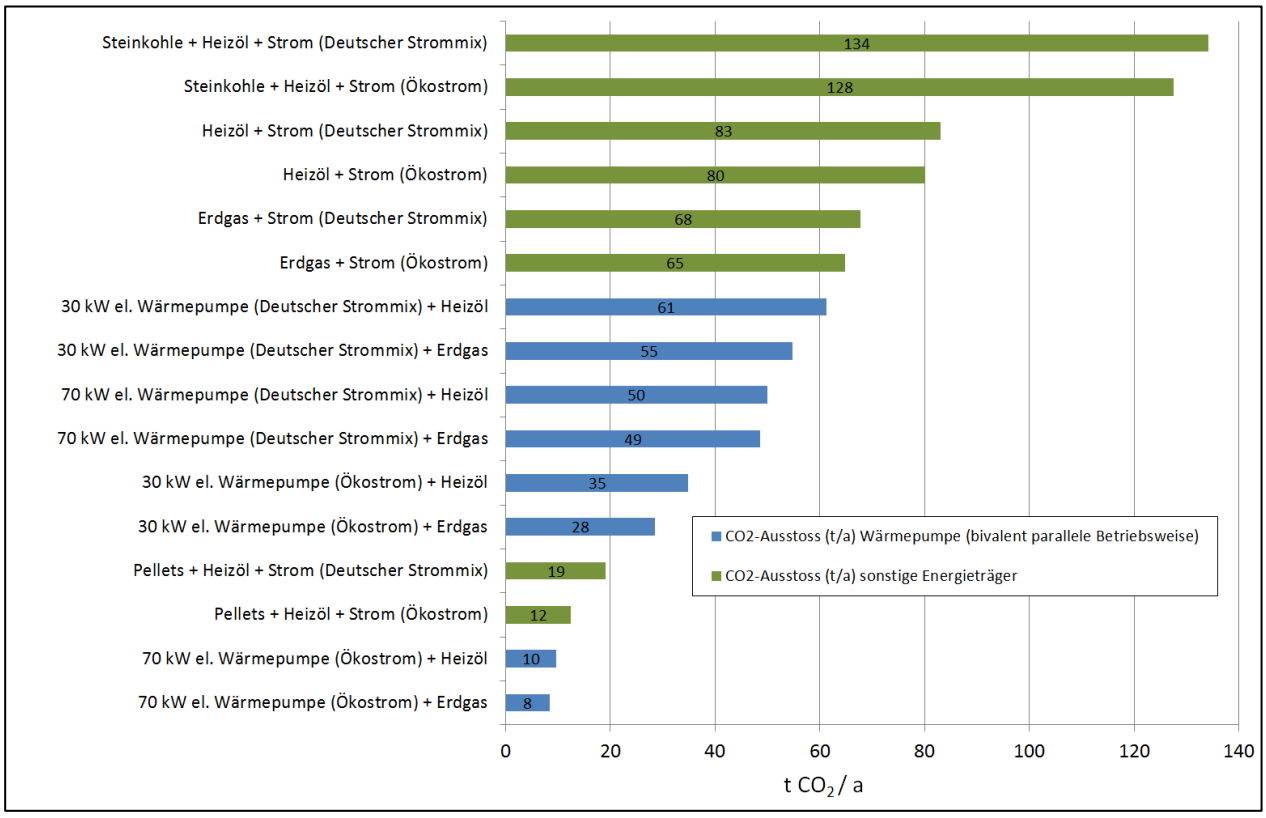



**Abbildung 56: $CO_2$-Ausstoß (t/a) unterschiedlicher Energievarianten – Modellbetrieb C**

# 7.2 Auslegung der geothermischen Systeme

## 7.2.1 Modellregion X (Raum Dresden)

### 7.2.1.1 Überblick der untersuchten Wärmequellensysteme

In der Region X sind für den Modellbetrieb C (in den Varianten I – 30 kW-Wärmepumpe und II – 70 kW-Wärmepumpe) alle drei geothermischen Entzugsverfahren untersucht worden:

- Oberflächennahe Erdwärmesonden
- Mitteltiefe Erdwärmesonden
- Brunnenanlage (offenes System)

Es erfolgten somit sechs numerische 3D-Modellierungen der erforderlichen Wärmequellenanlagen. Die Ergebnisse sind in grafischer Form nur für die Variante I (30 kW-Wärmepumpe) im Textteil dargestellt. Für die Variante II (70 kW-Wärmepumpe) werden die Abbildungen zu den Modellergebnissen überwiegend im Anlagenband (4.3.1) aufgeführt.

### 7.2.1.2 Ergebnisse Variante I – Grundlastabdeckung 30 kW-Wärmepumpe

#### Oberflächennahe Erdwärmesonden

Die generellen Randbedingungen für die Dimensionierungsrechnungen zur Auslegung der oberflächennahen Erdwärmesonden sind bereits in Kapitel 4.1 und Kapitel 4.2.2 dargestellt. Es werden also generell Erdwärmesonden aus PE vom Typ 4 x 32 mm x 3 mm eingesetzt. Aufgrund ihrer Bauartzulassung (mehrheitlich 16 bar) wird eine maximale Tiefe der Erdwärmesonden von 130 bis 140 m konzipiert.

Im Ergebnis mehrerer Iterationsrechnungen erwies sich eine oberflächennahe Erdwärmesondenanlage, bestehend aus **4 Erdwärmesonden zu je 115 m Endteufe (460 Bohrmeter)** als ausreichend zur Abdeckung der geforderten Lasten. Die räumliche Anordnung der Sonden im Betriebsgelände enthält die Abbildung 57.

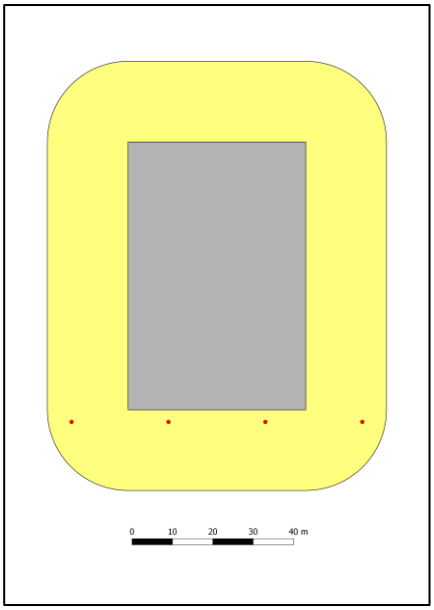



**Abbildung 57: Modellbetrieb C, Standort X, 30 kW-Wärmepumpe – Anordnung der oberflächennahen Erdwärmesonden**

Nach einer Simulationszeit von 25 Jahren werden mittlere Fluidtemperaturen von 1 °C berechnet. Die räumliche Ausbreitung der Temperaturfront ist in der Abbildung 58 dargestellt, der zeitliche Verlauf der Fluidtemperaturen in Abbildung 59. Die räumliche Ausbreitung der Temperaturfront ist für den Bereich des GWL dargestellt. Aus den Darstellungen wird deutlich, dass die Erdwärmesondenanlage nachhaltig funktionssicher ausgelegt ist.

Die Temperaturausbreitung im Festgestein (Modellregion X – Granodiorit, Modellregion Y – Grauwacke) erfolgt aufgrund der fehlenden Grundwasserströmung nahezu radialsymmetrisch um die Erdwärmesonden herum. Dies zeigen generell die Abbildungen zur Temperaturausbreitung im Untergrund für die Modellregion Z (z. B. Abbildung 73).

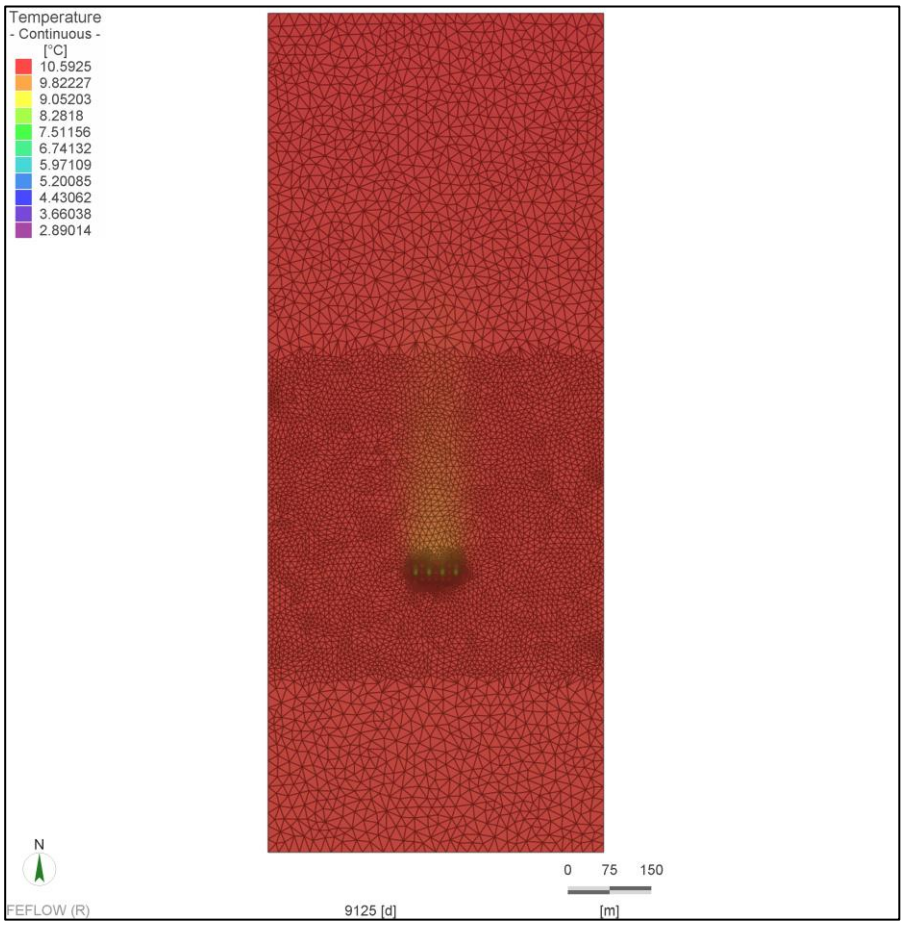



**Abbildung 58: Modellbetrieb C, Standort X, 30 kW-Wärmepumpe – Temperaturverhältnisse im GWL nach 25 Jahren (oberflächennahe Erdwärmesonden)**

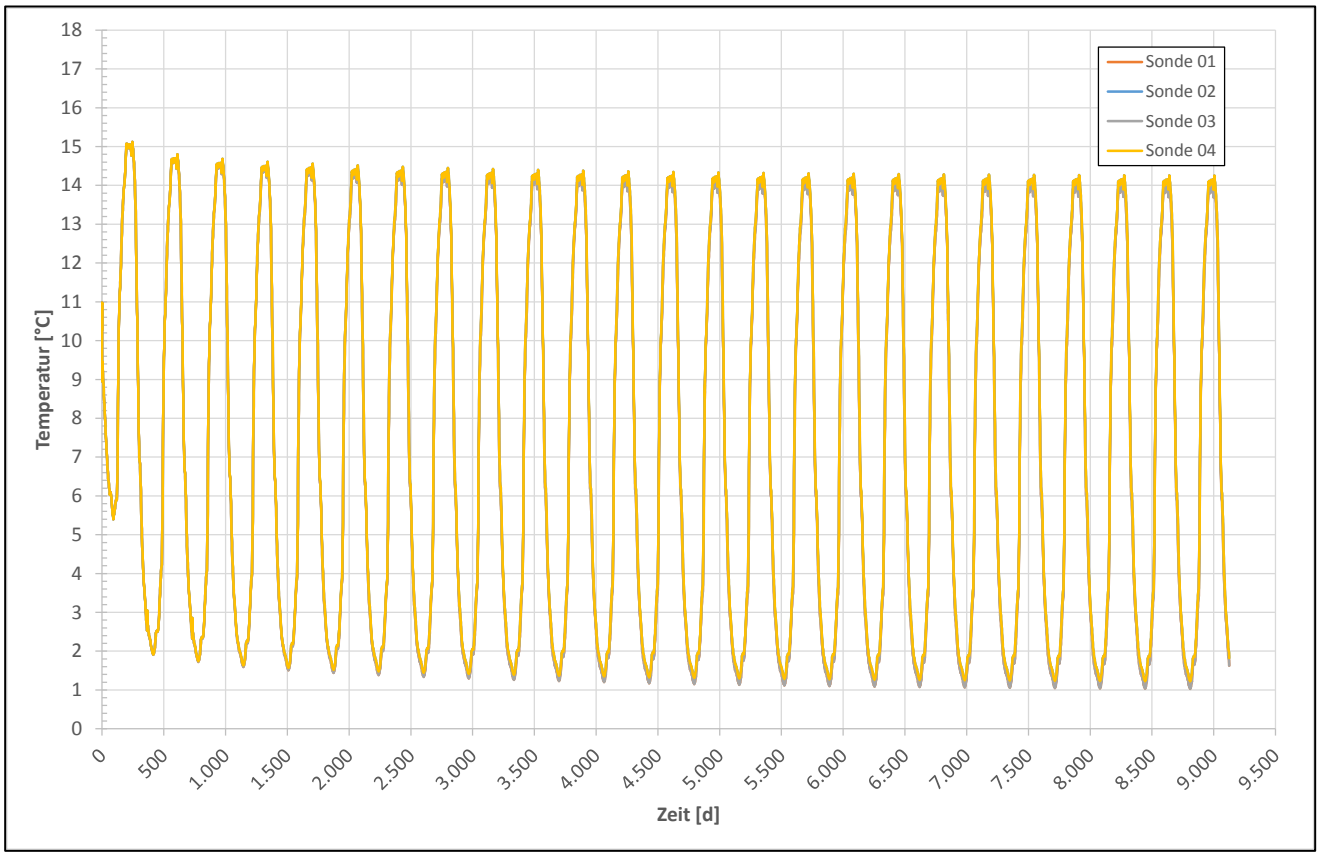



**Abbildung 59: Modellbetrieb C, Standort X, 30 kW-Wärmepumpe – Entwicklung der Fluidtemperaturen in 25 Jahren (oberflächennahe Erdwärmesonden)**

Die langjährig mittlere Entzugsleistung der konzipierten Erdwärmeanlage liegt im Ergebnis der Auslegung der Wärmequelle bei ca. 48 W/m.

### Mitteltiefe Erdwärmesonden

Im Ergebnis mehrerer Iterationsrechnungen erwies sich eine mitteltiefe Erdwärmesondenanlage, bestehend aus **einer Erdwärmesonde zu 540 m Endteufe,** als ausreichend zur Abdeckung der geforderten Lasten. Die Sonde wurde in der südwestlichen Ecke des Gewächshauskomplexes geplant. Jedoch ist generell auch jeder andere Standort möglich.

Im Vergleich mit den oberflächennahen Erdwärmesonden werden somit sogar 80 Bohrmeter mehr angesetzt. Im Ergebnis wird nach 25-jähriger Betriebszeit aber auch eine höhere Fluidtemperatur von ca. 1,3 °C berechnet. Bei Betrachtung beider Sondenanlagen (oberflächennah und mitteltief) sind diese somit effektiv etwa gleichwertig zu bewerten. Eine mathematisch exakte Simulation der Erdwärmesondenanlagen auf 0,0 °C ist modelltechnisch nicht bzw. nur mit erheblichem Aufwand möglich. Die Ergebnisse würden dadurch zudem nicht signifikant beeinflusst.

Die räumliche Ausbreitung der Temperaturfront ist in der Abbildung 60 dargestellt, der zeitliche Verlauf der Fluidtemperaturen in Abbildung 61.

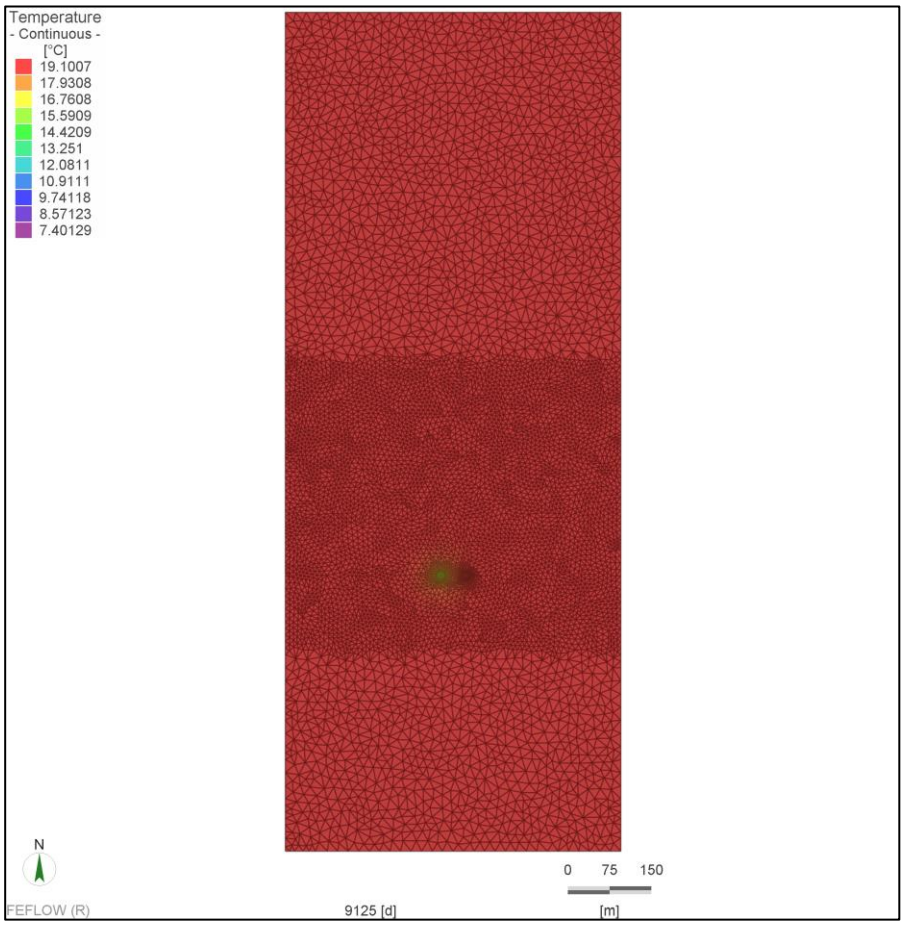



**Abbildung 60: Modellbetrieb C, Standort X, 30 kW-Wärmepumpe – Temperaturverhältnisse im GWL nach 25 Jahren (mitteltiefe Erdwärmesonde)**

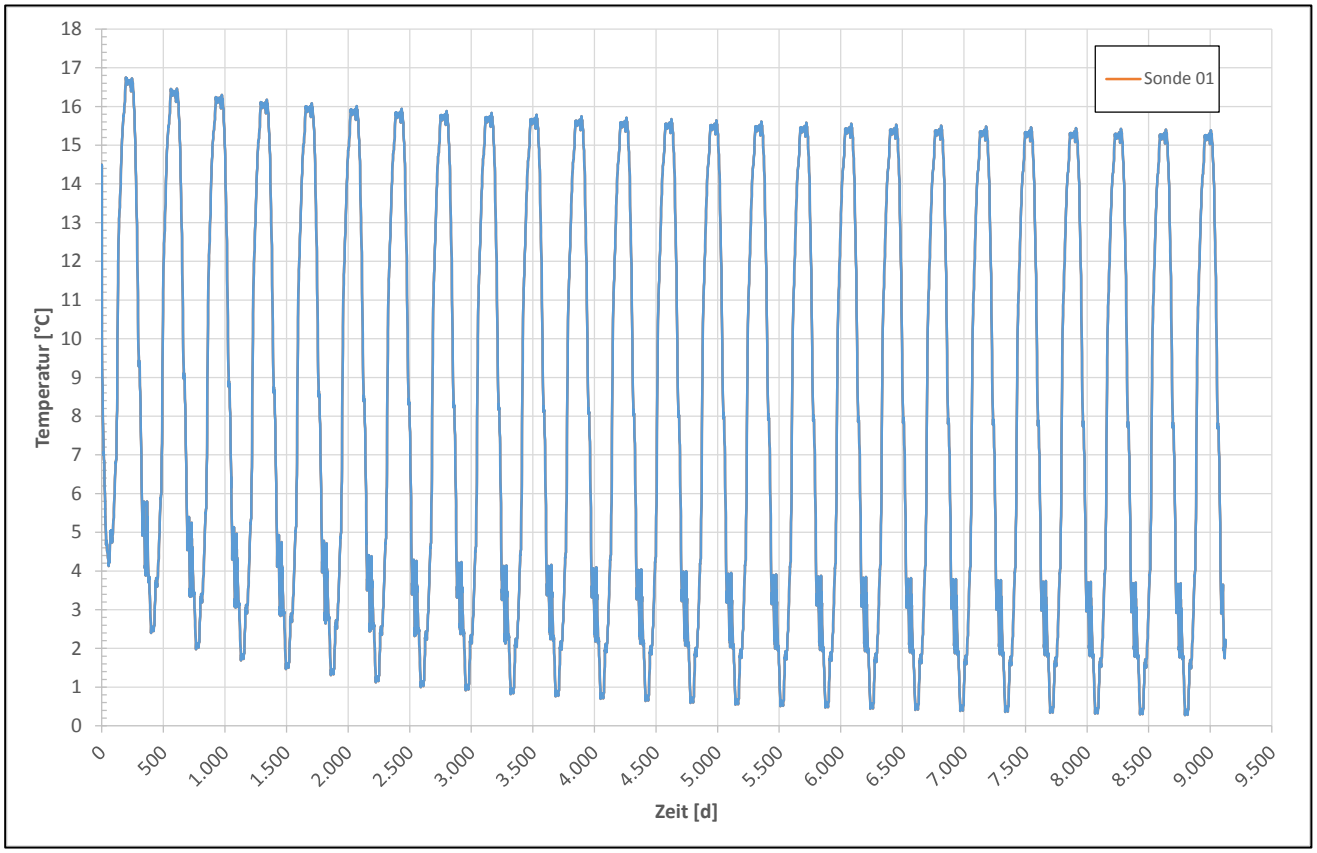



**Abbildung 61: Modellbetrieb C, Standort X, 30 kW-Wärmepumpe – Entwicklung der Fluidtemperaturen in 25 Jahren (mitteltiefe Erdwärmesonde)**

Die langjährig mittlere Entzugsleistung liegt im Ergebnis der Auslegung der Wärmequelle bei ca. 41 W/m.

### Brunnenanlage

Am Standort X wird (wie bei allen Betrieben) der von 1,0–20,0 m u. GOK reichende Grundwasserleiter genutzt. Im Ergebnis durchgeführter Recherchen handelsüblicher Wärmepumpen ist für die benötigte Heizleistung von 30 kW ein stündliches Grundwasservolumen zwischen ca. 6 und 8 m³/h erforderlich (bei zulässiger Temperaturspreizung von 6 K).

Das System aus Förder- und Injektionsbrunnen ist daher so zu planen, dass die Bereitstellung dieser Wassermengen nachhaltig ohne weiteres möglich ist. In der nachfolgenden Tabelle 40 sind Bohrung und Ausbau der Brunnen in Kurzform zusammengefasst. Die räumliche Darstellung der Brunnen enthält Abbildung 62. Für die genaue Erkundung der Brunnen bzw. deren Ausbaubemessung wurden mindestens zwei Vorbohrungen kalkuliert.

**Tabelle 40: Modellbetrieb C, Region X – Auslegung der Brunnenanlagen (beide Varianten)**

| - | Förderbrunnen | Injektionsbrunnen |
|---|---|---|
| Anzahl (Stück) | 1 | 2 |
| Bohrteufe (m u. GOK) | 21 | 21 |
| Ausbauteufe (m u. GOK) | 20,5 | 20,5 |
| Mindestbohrdurchmesser (mm) | 420 [480] | 420 |
| Ausbaudurchmesser (mm) | 200 [250] | 200 |
| Länge Sumpfrohr Edelstahl V2A (m) | 0,5 | 0,5 |
| Länge Filterrohr Edelstahl V2A (m) | 8,0 | 10,0 |
| Länge Vollrohr Edelstahl V2A (m) | 4,0 | 4,0 |
| Länge Vollrohr PVC (m) | 8,0 | 6,0 |

* Angaben in [Klammern] beziehen sich auf die 70 kW-Wärmepumpe – Variante II

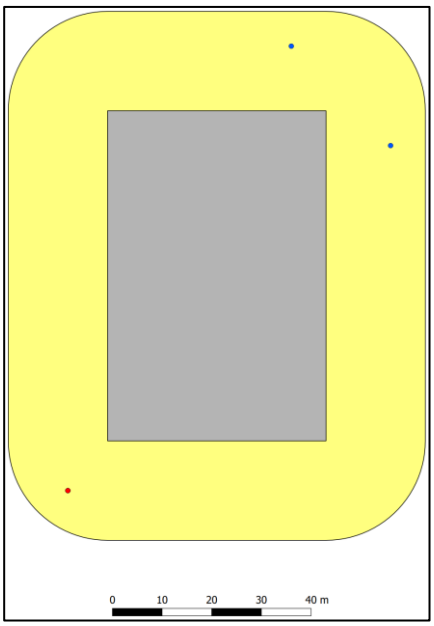



**Abbildung 62: Modellbetrieb C, Standort X, 30 kW-Wärmepumpe – Anordnung der Brunnen**

Wie in Abbildung 63 dargestellt, ist für die vorliegende Modellbetrachtung eine offene Grundwassernutzung möglich. Die von den Injektionsbrunnen ausgehende Abkühlungsfront beeinflusst die Förderbrunnen nicht. Die gewählte Brunnenkonfiguration ist somit ausreichend (hinsichtlich Anzahl, Lage und Ausbau).

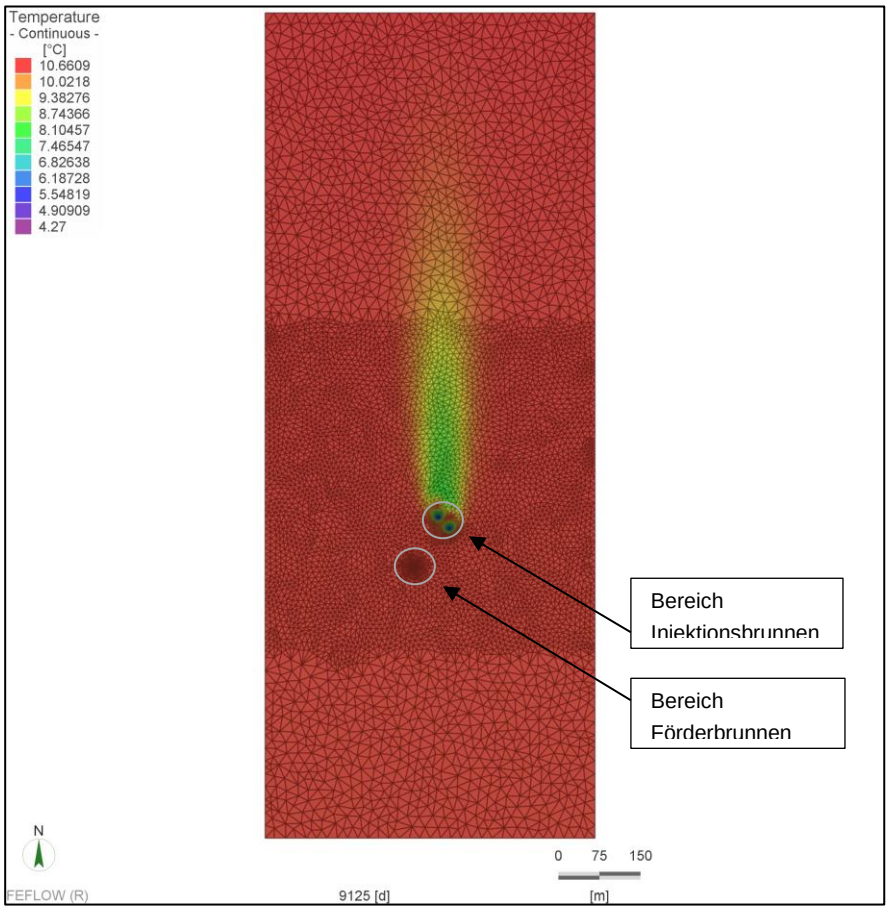



**Abbildung 63: Modellbetrieb C, Standort X, 30 kW-Wärmepumpe – Temperaturfronten im Bereich der Brunnenanlage**

Wie bereits in Kapitel 4.1.3 dargestellt, wird noch einmal ausdrücklich darauf hingewiesen, dass hinsichtlich Anzahl und Ausbau der Brunnen höchster Wert auf eine langjährig betriebssichere Funktionsweise der Gesamtanlage gelegt wurde. Die Brunnen sind daher durchweg sehr großzügig und hochwertig konzipiert und erlauben eine bedarfsgerechte, mehrmalige Regenerierung mit **allen** marktüblichen Verfahren. Eine Aufbereitung des Wassers nach der Förderung ist generell erforderlich – gilt auch für Region Y.

#### 7.2.1.3 Ergebnisse Variante II – Grundlastabdeckung 70 kW-Wärmepumpe

**Oberflächennahe Erdwärmesonden**

Im Ergebnis mehrerer Iterationsrechnungen erweist sich eine oberflächennahe Erdwärmesondenanlage, bestehend aus **7 Erdwärmesonden zu je 132m Endteufe (924 Bohrmeter),** als ausreichend zur Abdeckung der geforderten Lasten. Die räumliche Anordnung der Sonden im Betriebsgelände enthält die Abbildung 30 im Anlagenband (4.3.1).

Nach einer Simulationszeit von 25 Jahren werden mittlere Fluidtemperaturen von 0,6 °C berechnet. Die räumliche Ausbreitung der Temperaturfront und der zeitliche Verlauf der Fluidtemperaturen sind im Anlagenband (4.3.1), Abbildung 31 und Abbildung 32 dargestellt. Aus den Darstellungen wird deutlich, dass die Erdwärmesondenanlage nachhaltig funktionssicher ausgelegt ist. Unter Bezugnahme auf die erbrachte Jahresheizarbeit und Heizleistung ergibt sich eine Betriebsstundenzahl von 3.102. Die langjährig mittlere Entzugsleistung liegt im Ergebnis der Auslegung der Wärmequelle bei ca. 55,8 W/m.

#### Mitteltiefe Erdwärmesonden

Unter Beachtung einer Wärmequelle aus mitteltiefen Erdwärmesonden zeigte sich im Ergebnis der Modellierungen die Anzahl von **2 Erdwärmesonden zu je 470 m Endteufe (940 Bohrmeter)** als ausreichend zur Abdeckung der geforderten Lasten. Die räumliche Anordnung der Sonden im Betriebsgelände enthält die Abbildung 33 im Anlagenband (4.3.1).

Im Vergleich mit den oberflächennahen Erdwärmesonden werden somit sogar 16 Bohrmeter mehr benötigt. Dies kann vermutlich darauf zurückgeführt werden, dass der Modellbetrieb C der einzige Betrieb ist, bei dem in den Sommermonaten Energie aus dem Gewächshauskomplex in den Untergrund abgeführt wird. Bei den oberflächennahen Erdwärmesonden wird diese Energie geringfügig besser im Untergrund gespeichert und kann somit während der Heizperiode wieder genutzt werden.

Nach einer Simulationszeit von 25 Jahren werden mittlere Fluidtemperaturen von 0,3 °C berechnet. Die räumliche Ausbreitung der Temperaturfront und der zeitliche Verlauf der Fluidtemperaturen sind in Abbildung 34 und Abbildung 35 des Anlagenbandes (4.3.1) zu sehen. Die langjährig mittlere Entzugsleistung liegt im Ergebnis der Auslegung der Wärmequelle bei ca. 55 W/m.

#### Brunnenanlage

Für die Betrachtung der Grundlastabdeckung über eine 70 kW-Wärmepumpe werden die identischen Randbedingungen hinsichtlich des genutzten GWL wie bei der 30 kW-Wärmepumpe angesetzt. Die Förderleistung liegt bei 12–15 m³/h. Die Konfiguration der Brunnenanlage ist bereits in Tabelle 40 aufgeführt. Die räumliche Darstellung der Brunnen enthält Abbildung 36 im Anlagenband (4.3.1). Für die genaue Erkundung der Brunnen bzw. deren Ausbaubemessung wurden auch hier mindestens zwei Vorbohrungen kalkuliert.

Wie im Anlagenband (4.3.1; Abbildung 37) dargestellt, ist für die vorliegende Modellbetrachtung eine offene Grundwassernutzung möglich. Die von den Injektionsbrunnen ausgehende Abkühlungsfront beeinflusst den Förderbrunnen auch nach 25 Jahren nicht. Die gewählte Brunnenkonfiguration ist somit ausreichend (hinsichtlich Anzahl, Lage und Ausbau). Die vorherige Aufbereitung des Grundwassers ist bei einer offenen Grundwassernutzung am Standort X generell erforderlich, um einen **langjährig sicheren Betrieb** zu ermöglichen.

### 7.2.2 Modellregion Y (Raum Leipzig)

#### 7.2.2.1 Überblick der untersuchten Wärmequellensysteme

In der Region Y sind für den Modellbetrieb C alle drei geothermischen Entzugsverfahren untersucht worden:

- Oberflächennahe Erdwärmesonden
- Mitteltiefe Erdwärmesonden
- Brunnenanlage (offenes System)

Es erfolgten somit auch hier sechs numerische 3D-Modellierungen der erforderlichen Wärmequellenanlagen. Die Ergebnisse sind grafisch nur für die Variante I (Grundlastabdeckung über 30 kW-Wärmepumpe) im Textteil dargestellt. Für die Variante II werden die Abbildungen zu den Modellergebnissen überwiegend im Anlagenband (4.3.2) aufgeführt.

#### 7.2.2.2 Ergebnisse Variante I – Grundlastabdeckung 30 kW-Wärmepumpe

**Oberflächennahe Erdwärmesonden**

Im Ergebnis der erfolgten Berechnungen sind zur Abdeckung der erforderlichen Lasten **5 Erdwärmesonden zu je 133 m Endteufe (665 Bohrmeter)** erforderlich. Die räumliche Anordnung der Sonden im Betriebsgelände enthält die Abbildung 64. Im Vergleich mit der Region X ist die Anordnung geothermisch etwas ungünstiger.

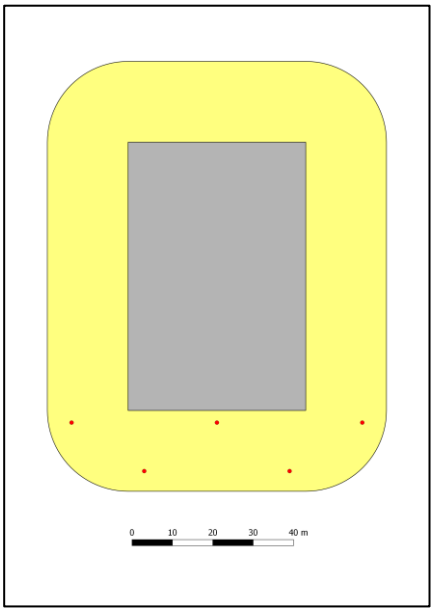



**Abbildung 64: Modellbetrieb C, Standort Y, 30 kW-Wärmepumpe – Anordnung der oberflächennahen Erdwärmesonden**

Nach einer Simulationszeit von 25 Jahren werden mittlere Fluidtemperaturen von 1,4 °C berechnet. Die räumliche Ausbreitung der Temperaturfront und der zeitliche Verlauf der Fluidtemperaturen sind in Abbildung 65 bzw. Abbildung 66 zu sehen. Aus den Darstellungen wird deutlich, dass die Erdwärmesondenanlage nachhaltig funktionssicher ausgelegt ist und sogar noch Reserven besitzt.

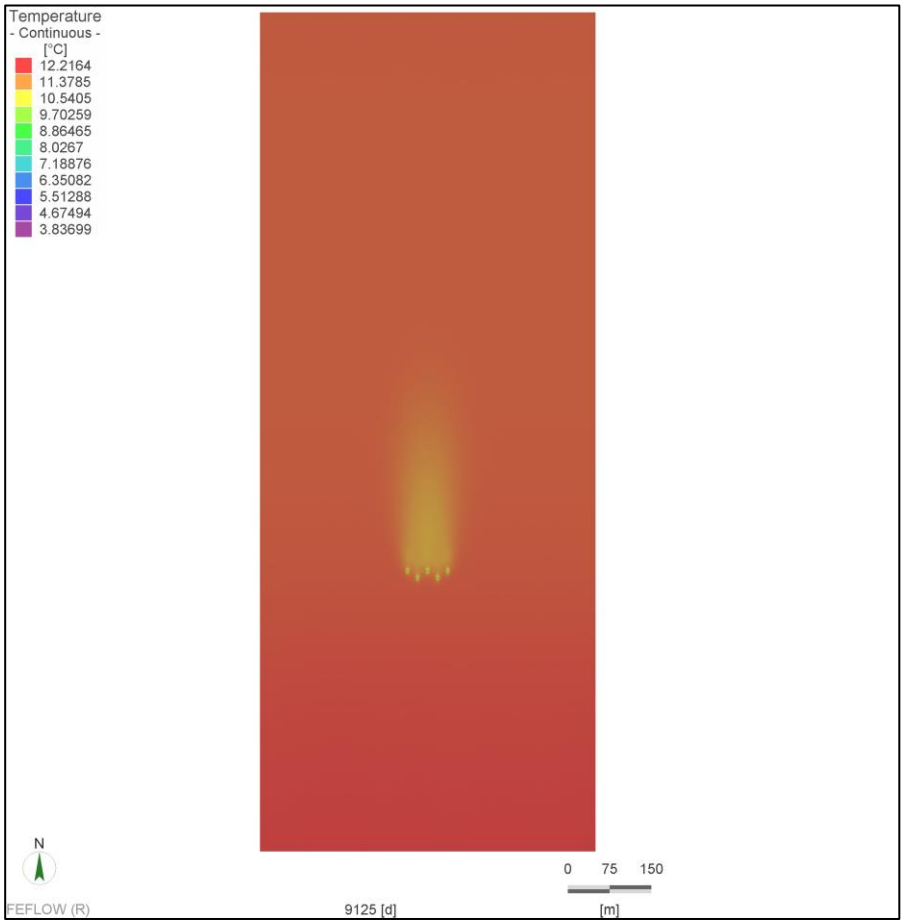



**Abbildung 65: Modellbetrieb C, Standort Y, 30 kW-Wärmepumpe – Temperaturverhältnisse im Grundwasserleiter (oberflächennahe Erdwärmesonden)**

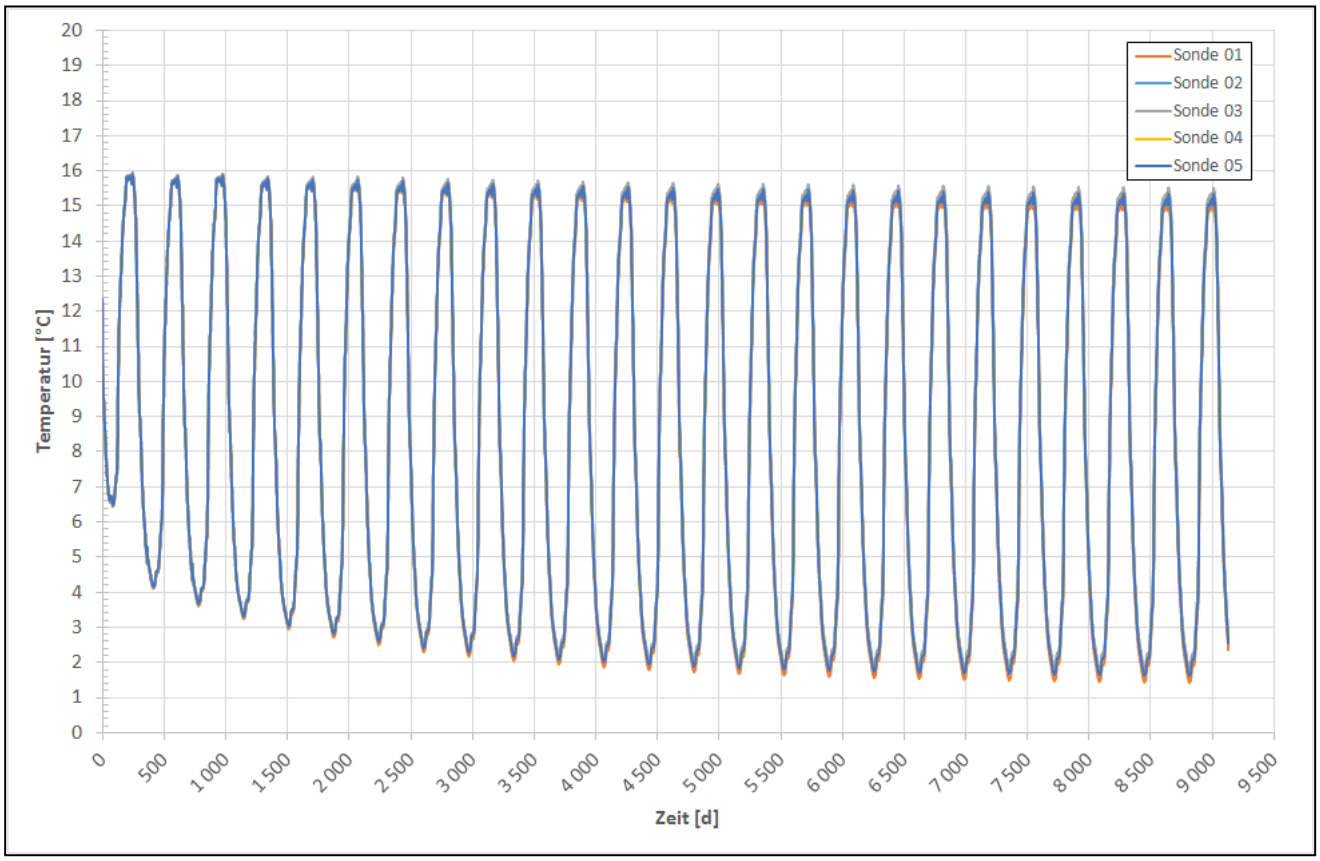



**Abbildung 66: Modellbetrieb C, Standort Y, 30 kW-Wärmepumpe – Entwicklung der Fluidtemperaturen in 25 Jahren (oberflächennahe Erdwärmesonden)**

Unter Bezugnahme auf die erbrachte Jahresheizarbeit und Heizleistung ergibt sich eine Betriebsstundenzahl von 4.640 h. Die langjährig mittlere Entzugsleistung liegt im Ergebnis der Auslegung der Wärmequelle bei ca. 33 W/m.

### Mitteltiefe Erdwärmesonden

Im Ergebnis mehrerer Iterationsrechnungen erwies sich eine mitteltiefe Erdwärmesondenanlage, bestehend aus **2 Erdwärmesonden zu je 350 m Endteufe (700 Bohrmeter)** als ausreichend zur Abdeckung der geforderten Lasten. Die räumliche Anordnung der Sonden im Betriebsgelände enthält die Abbildung 67.

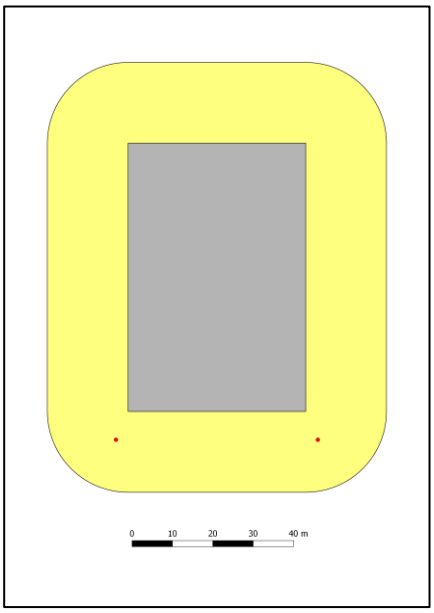



**Abbildung 67: Modellbetrieb C, Standort Y, 30 kW-Wärmepumpe – Anordnung der mitteltiefen Erdwärmesonden**

Im Vergleich mit den oberflächennahen Erdwärmesonden werden somit 35 Bohrmeter mehr benötigt. Im Vergleich mit dem analogen Modellansatz für den Standort X sind 160 Bohrmeter mehr notwendig. Wie bereits in Kapitel 7.2.1.3 erläutert, wird dies auf eine etwas höhere Speicherwirkung des flacheren, durch die oberflächennahen Sonden erschlossenen Untergrundes (hinsichtlich der eingebrachten Kühlenergie) zurückgeführt.

Nach einer Simulationszeit von 25 Jahren werden mittlere Fluidtemperaturen von 2,3 °C berechnet. Es handelt sich somit um die am „wärmsten“ ausgelegte Erdwärmesondenanlage im Rahmen aller durchgeführten Modellbetrachtungen. Eine geringfügige Verkürzung der Erdwärmesonden wäre somit zwar möglich, würde sich auf die gesamten Investitionskosten bzw. die Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen aber nicht signifikant auswirken. Die räumliche Ausbreitung der Temperaturfront und der zeitliche Verlauf der Fluidtemperaturen sind in der Abbildung 68 bzw. Abbildung 69 zu sehen.

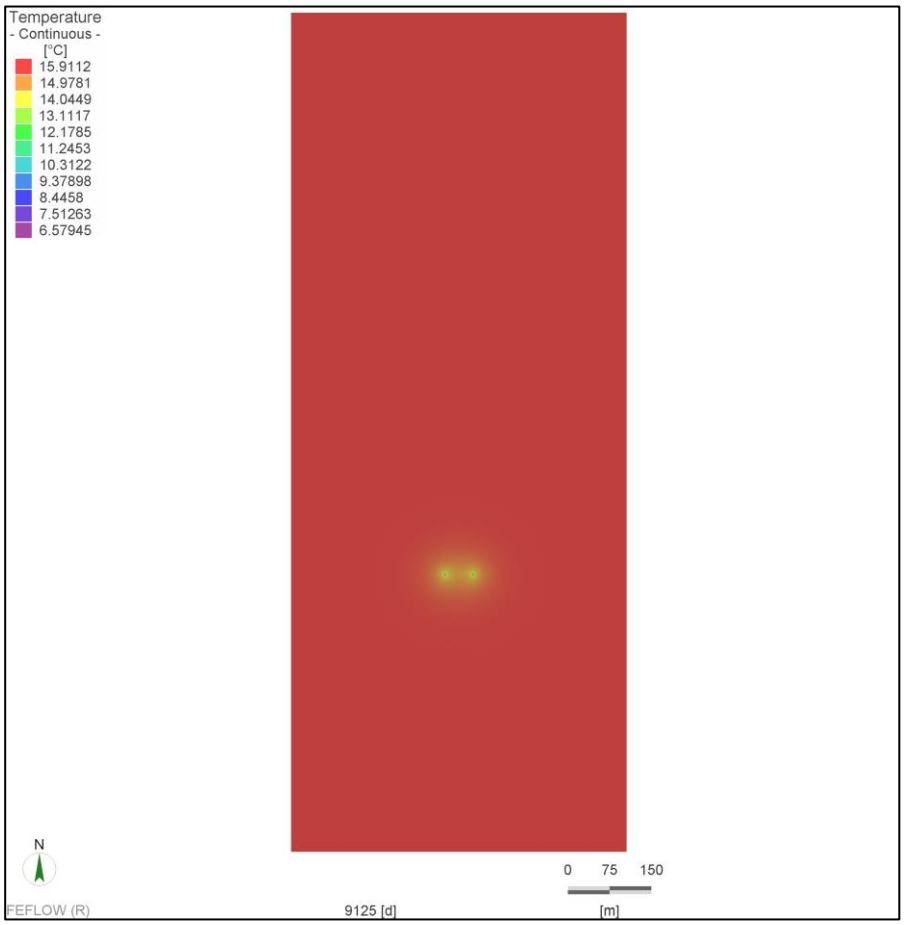



**Abbildung 68: Modellbetrieb C, Standort Y, 30 kW-Wärmepumpe – Temperaturverhältnisse im GWL nach 25 Jahren (mitteltiefe Erdwärmesonden)**

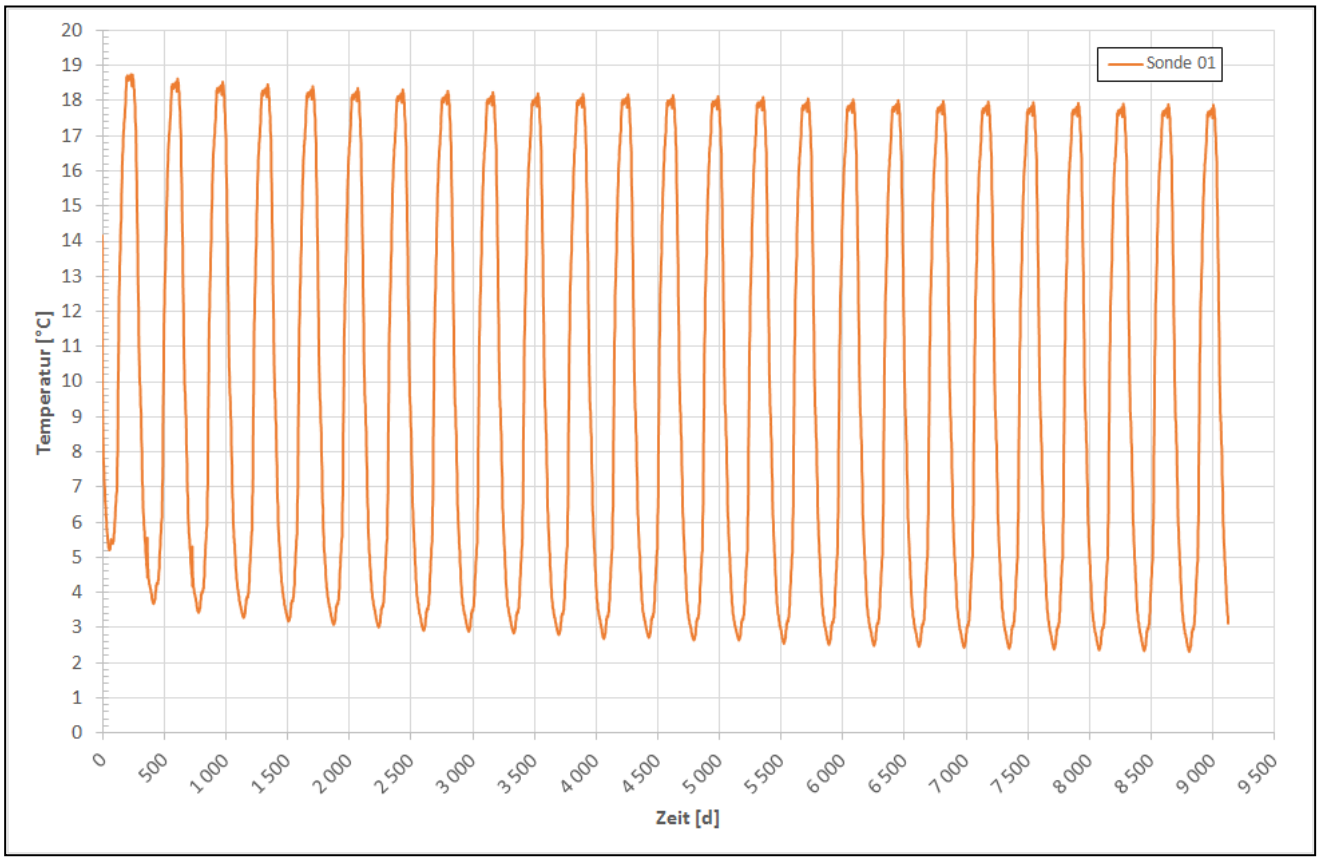



**Abbildung 69: Modellbetrieb C, Standort Y, 30 kW-Wärmepumpe – Entwicklung der Fluidtemperaturen in 25 Jahren (mitteltiefe Erdwärmesonden)**

Die langjährig mittlere Entzugsleistung liegt im Ergebnis der Auslegung der Wärmequelle bei ca. 31,6 W/m.

### Brunnenanlage

Am Standort Y wird der erste bedeckte GWL von 10,0–25,0 m u. GOK genutzt. Auch hier wird zum Betrieb einer Wärmepumpe mit 30 kW Heizleistung ein stündliches Grundwasservolumen zwischen ca. 6 und 8 m³/h benötigt (bei zulässiger Temperaturspreizung von 6 K).

In der nachfolgenden Tabelle 41 sind Bohrung und Ausbau der Brunnen in Kurzform zusammengefasst. Die räumliche Darstellung der Brunnen enthält Abbildung 70.

Für die genaue Erkundung der Brunnen bzw. deren Ausbaubemessung wurden mindestens zwei Vorbohrungen kalkuliert.

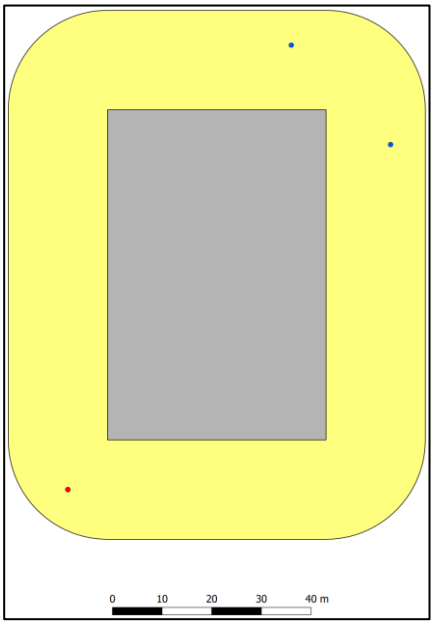



**Abbildung 70: Modellbetrieb C, Standort Y, 30 kW-Wärmepumpe – Anordnung der Brunnen**

**Tabelle 41: Modellbetrieb C, Region Y – Auslegung der Brunnenanlagen (beide Varianten)**

| - | Förderbrunnen | Injektionsbrunnen |
|---|---|---|
| Anzahl (Stück) | 1 | 2 |
| | | |
| Bohrteufe (m u. GOK) | 26 | 26 |
| Ausbauteufe (m u. GOK) | 25,5 | 25,5 |
| Mindestbohrdurchmesser (mm) | 420 [480]* | 420 |
| Ausbaudurchmesser (mm) | 200 [250]* | 200 |
| Länge Sumpfrohr Edelstahl V2A (m) | 0,5 | 0,5 |
| Länge Filterrohr Edelstahl V2A (m) | 8,0 | 10,0 |
| Länge Vollrohr Edelstahl V2A (m) | 4,0 | 4,0 |
| Länge Vollrohr PVC (m) | 13,0 | 11,0 |

* Angaben in [ ]-Klammern beziehen sich auf die 70 kW Wärmepumpe – Variante II

Wie der Abbildung 71 zu entnehmen ist, ist für die vorliegende Modellbetrachtung eine offene Grundwassernutzung möglich. Die von den Injektionsbrunnen ausgehende Abkühlungsfront beeinflusst den Förderbrunnen auch nach 25 Jahren nicht. Die gewählte Brunnenkonfiguration ist somit ausreichend (hinsichtlich Anzahl, Lage und Ausbau).

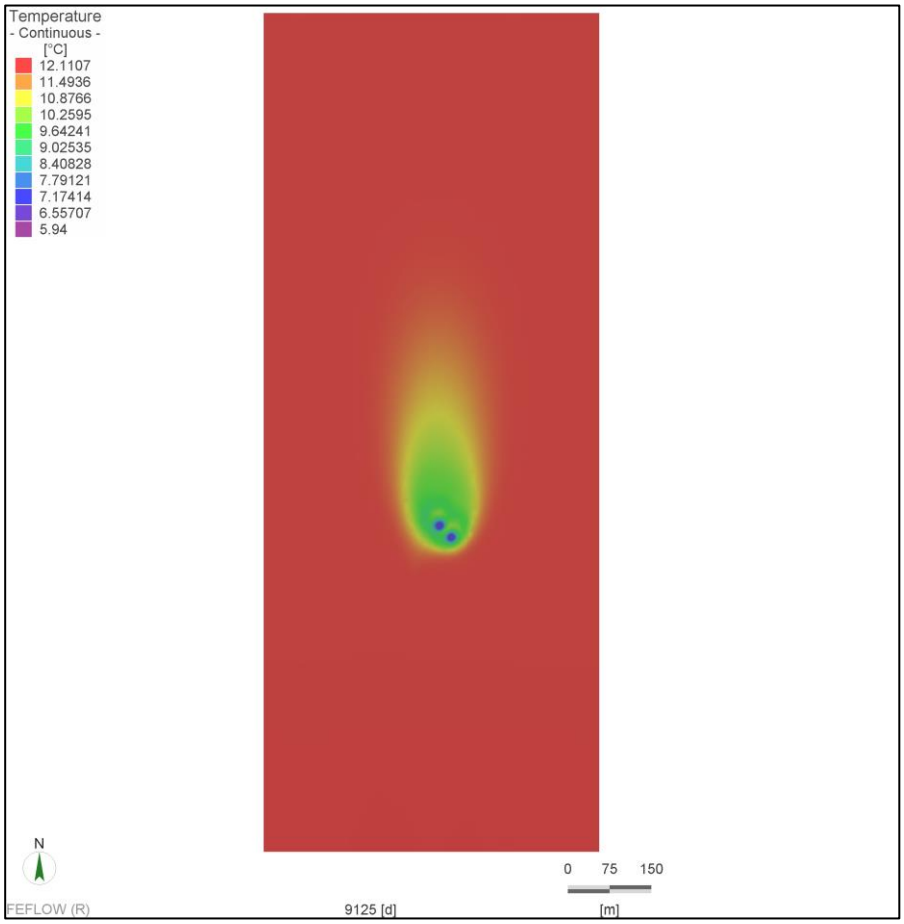



**Abbildung 71: Modellbetrieb C, Standort Y, 30 kW-Wärmepumpe – Temperaturverhältnisse im GWL nach 25 Jahren (Brunnenanlage)**

Die vorherige Aufbereitung des Grundwassers ist bei einer offenen Grundwassernutzung am Standort Y generell erforderlich, um einen **langjährig sicheren Betrieb** zu ermöglichen.

#### 7.2.2.3 Ergebnisse Variante II – Grundlastabdeckung 70 kW-Wärmepumpe

**Oberflächennahe Erdwärmesonden**

Im Ergebnis der Modellrechnungen erwies sich eine oberflächennahe Erdwärmesondenanlage, bestehend aus **10 Erdwärmesonden zu je 133 m Endteufe (1.330 Bohrmeter)** als ausreichend zur Abdeckung der geforderten Lasten. Die räumliche Anordnung der Sonden im Betriebsgelände enthält die Abbildung 38 im Anlagenband (4.3.2).

Nach einer Simulationszeit von 25 Jahren werden mittlere Fluidtemperaturen von 0,8 °C berechnet. Die räumliche Ausbreitung der Temperaturfront und der zeitliche Verlauf der Fluidtemperaturen sind in Abbildung 39 und Abbildung 40 des Anlagenbandes (4.3.2) dargestellt. Dort wird deutlich, dass die Erdwärmesondenanlage nachhaltig funktionssicher ausgelegt ist.

Unter Bezugnahme auf die erbrachte Jahresheizarbeit und Heizleistung ergibt sich eine Betriebsstundenzahl von 3.102 h. Die langjährig mittlere Entzugsleistung liegt im Ergebnis der Auslegung der Wärmequelle bei ca. 38,8 W/m.

#### Mitteltiefe Erdwärmesonden

Unter Beachtung einer Wärmequelle aus mitteltiefen Erdwärmesonden zeigte sich im Ergebnis der Modellierungen die Anzahl von **2 Erdwärmesonden zu je 500 m Endteufe (1.000 Bohrmeter)** als ausreichend zur Abdeckung der geforderten Lasten. Die räumliche Anordnung der Sonden im Betriebsgelände enthält die Abbildung 41 im Anlagenband (4.3.2). Im Vergleich mit den oberflächennahen Erdwärmesonden werden somit 330 Bohrmeter weniger benötigt.

Nach einer Simulationszeit von 25 Jahren werden mittlere Fluidtemperaturen von 0,4 °C berechnet. Die räumliche Ausbreitung der Temperaturfront und der zeitliche Verlauf der Fluidtemperaturen sind in Abbildung 42 und Abbildung 43 des Anlagenbandes (4.3.2) zu sehen. Die langjährig mittlere Entzugsleistung liegt im Ergebnis der Auslegung der Wärmequelle bei ca. 51,6 W/m.

#### Brunnenanlage

Für die Betrachtung der Grundlastabdeckung mit einer 70 kW-Wärmepumpe werden für die Region Y die identischen Randbedingungen hinsichtlich genutzter GWL und notwendiger Förderleistungen wie bei der Region X angesetzt. Die Brunnenplanung ist bereits in der Tabelle 41 enthalten.

Wie in Abbildung 45 des Anlagenbandes (4.3.2) dargestellt, ist für die vorliegende Modellbetrachtung eine offene Grundwassernutzung noch möglich. Die von den Injektionsbrunnen ausgehende Abkühlungsfront beeinflusst den Förderbrunnen nach 25 Jahren zwar, jedoch besteht noch kein ausgeprägter hydraulischer Kurzschluss. Die gewählte Brunnenkonfiguration ist somit noch ausreichend (hinsichtlich Anzahl, Lage und Ausbau).

### 7.2.3 Modellregion Z (Raum Chemnitz)

#### 7.2.3.1 Überblick der untersuchten Wärmequellensysteme

Vor dem genannten Hintergrund eines fehlenden, durchgehend vorhandenen und permanent ausreichend ergiebigen GWL (siehe entsprechende Ausführungen zu den Modellbetrieben A und B) ist für die Modellregion Z **keine** offene Grundwassernutzung möglich. Es verbleiben somit nur zwei Wärmequellensysteme:

- Oberflächennahe Erdwärmesonden
- Mitteltiefe Erdwärmesonden

Folglich sind für die Modellregion Z vier numerische 3D-Modellierungen der erforderlichen Wärmequellenanlagen erfolgt. Analog den Modellregionen X und Y sind die Ergebnisse in grafischer Form nur für die Variante I (30 kW-Wärmepumpe) im Textteil dargestellt. Für die Variante II werden die Abbildungen zu den Modellergebnissen überwiegend im Anlagenband (4.3.3) aufgeführt.

#### 7.2.3.2 Ergebnisse Variante I – Grundlastabdeckung 30 kW-Wärmepumpe

#### Oberflächennahe Erdwärmesonden

Im Ergebnis der erfolgten Berechnungen sind zur Abdeckung der erforderlichen Lasten **6 Erdwärmesonden zu je 135 m Endteufe (810 Bohrmeter)** erforderlich. Die räumliche Anordnung der Sonden im Betriebsgelände enthält die Abbildung 72. Im Vergleich mit den Regionen X und Y werden insgesamt 350 bzw. 145 Bohrmeter mehr benötigt. Wie bereits erläutert, sind in der Modellregion Z im Vergleich mit den Modellregionen X und Y generell mehr Bohrmeter zur Abdeckung identischer Lastanforderungen notwendig. Ursächlich dafür sind in erster Linie die geringeren Untergrundtemperaturen, die geringere teufenabhängige Temperaturzu-

nahme und der weitgehend fehlende konvektive Wärmetransport durch das Grundwasser (keine Grundwasserleiter ausgebildet) in der Modellregion Z.

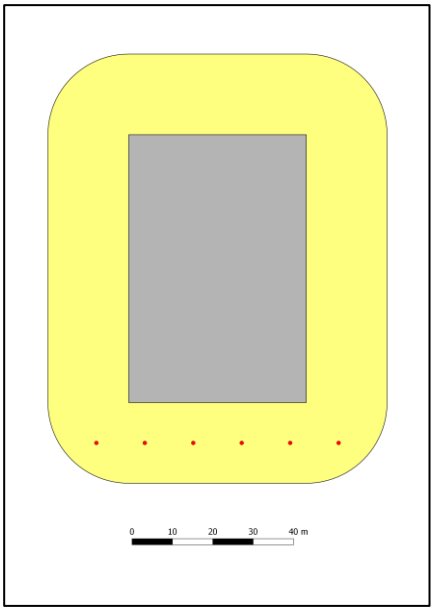



**Abbildung 72: Modellbetrieb C, Standort Z, 30 kW-Wärmepumpe – Anordnung der oberflächennahen Erdwärmesonden**

Nach einer Simulationszeit von 25 Jahren werden mittlere Fluidtemperaturen von 0,9 °C berechnet. Die räumliche Ausbreitung der Temperaturfront und der zeitliche Verlauf der Fluidtemperaturen sind in Abbildung 73 und Abbildung 74 zu sehen. Aus den Darstellungen wird deutlich, dass die Erdwärmesondenanlage nachhaltig funktionssicher ausgelegt ist.

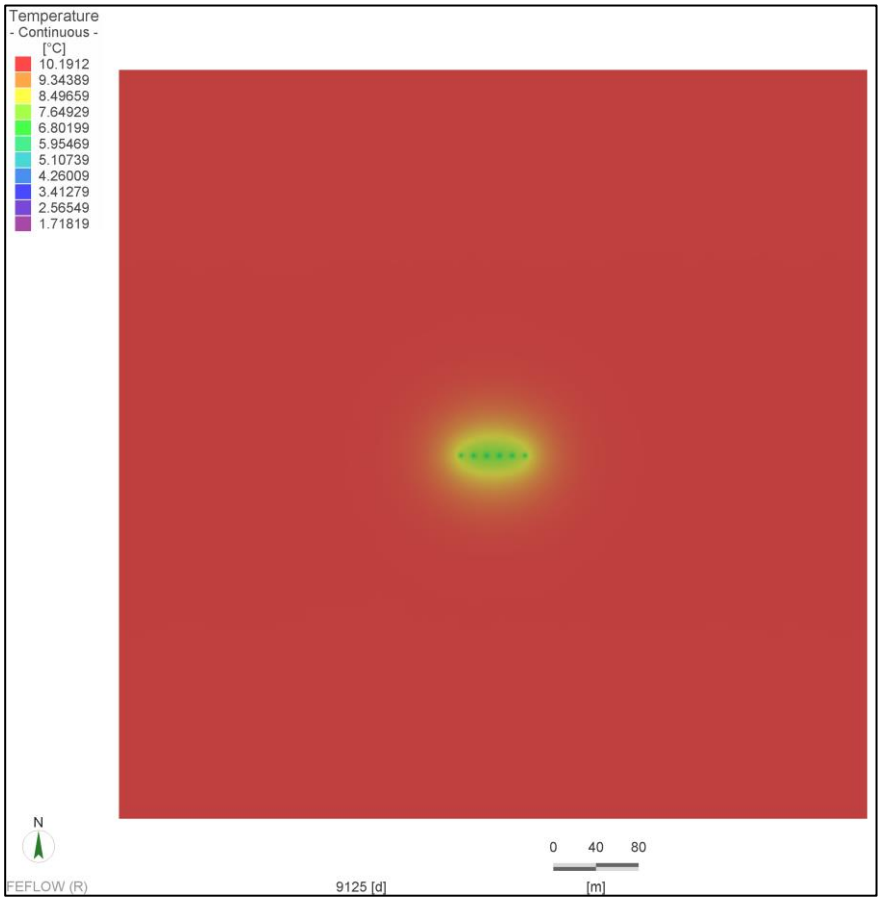



**Abbildung 73: Modellbetrieb C, Standort Z, 30 kW-Wärmepumpe – Temperaturverhältnisse im Untergrund nach 25 Jahren (oberflächennahe Erdwärmesonden)**

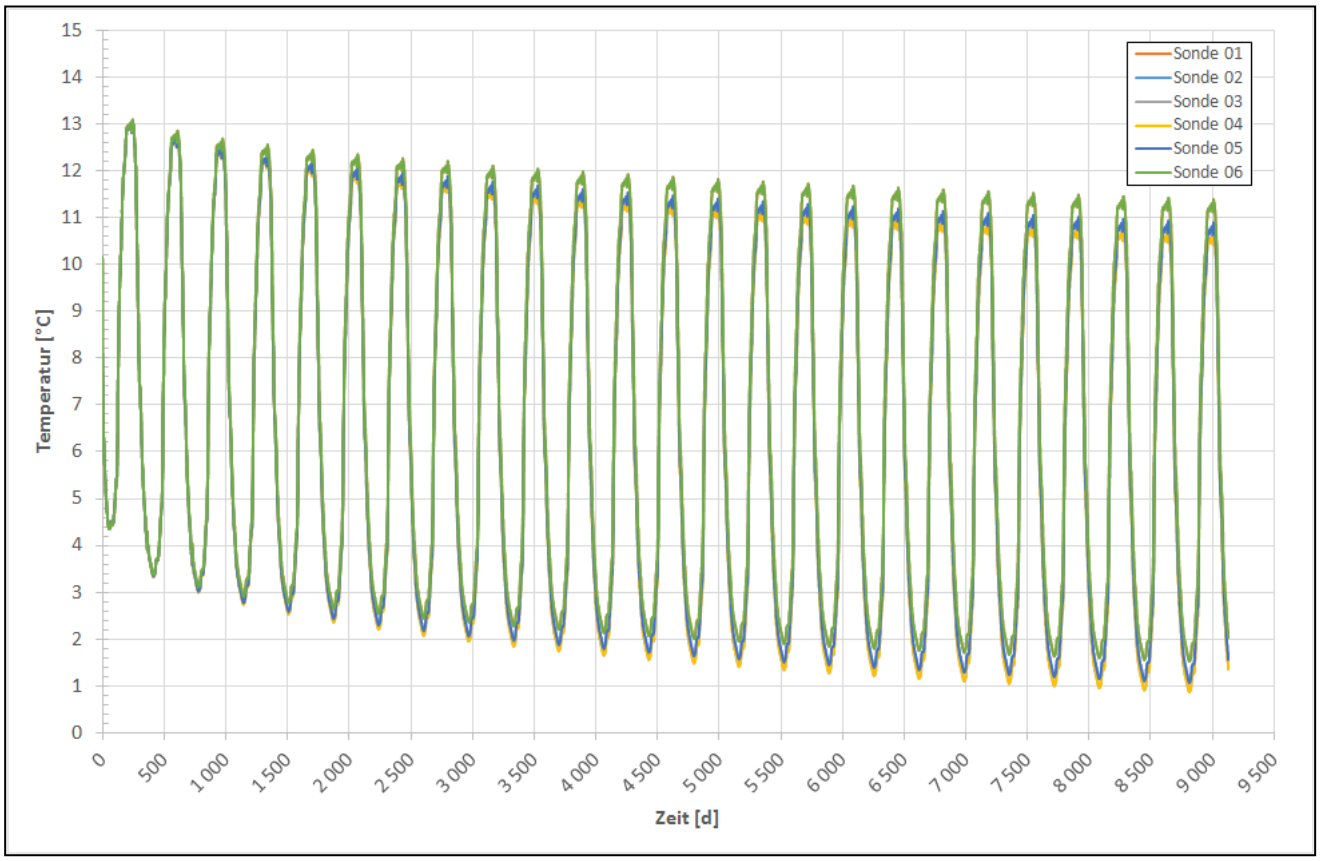



**Abbildung 74: Modellbetrieb C, Standort Z, 30 kW-Wärmepumpe – Entwicklung der Fluidtemperaturen in 25 Jahren (oberflächennahe Erdwärmesonden)**

Unter Bezugnahme auf die erbrachte Jahresheizarbeit und Heizleistung ergibt sich eine Betriebsstundenzahl von 4.640 h. Die langjährig mittlere Entzugsleistung liegt im Ergebnis der Auslegung der Wärmequelle bei ca. 27,3 W/m.

### Mitteltiefe Erdwärmesonden

Zur Abdeckung der erforderlichen Lasten über mitteltiefe Erdwärmesonden werden insgesamt **2 Erdwärmesonden zu je 400 m Endteufe (800 Bohrmeter)** benötigt. Die räumliche Anordnung der Sonden im Betriebsgelände enthält die Abbildung 75.

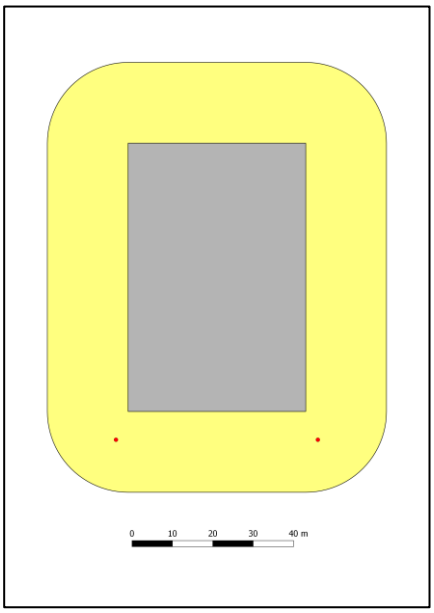



**Abbildung 75: Modellbetrieb C, Standort Z, 30 kW-Wärmepumpe – Anordnung der mitteltiefen Erdwärmesonden**

Im Vergleich mit den oberflächennahen Erdwärmesonden werden somit 10 Bohrmeter weniger benötigt. Im Vergleich mit den analogen Modellansätzen für die Standorte X und Y sind 260 bzw. 100 Bohrmeter mehr notwendig. Trotz der höchsten Wärmeleitfähigkeit des Grundgebirges am Standort Z (im Vergleich mit X und Y) überwiegt dort der Effekt der geringsten Untergrundtemperaturen.

Nach einer Simulationszeit von 25 Jahren werden mittlere Fluidtemperaturen von 2,2 °C berechnet. Die räumliche Ausbreitung der Temperaturfront und der zeitliche Verlauf der Fluidtemperaturen sind in Abbildung 76 und Abbildung 77 zu sehen.

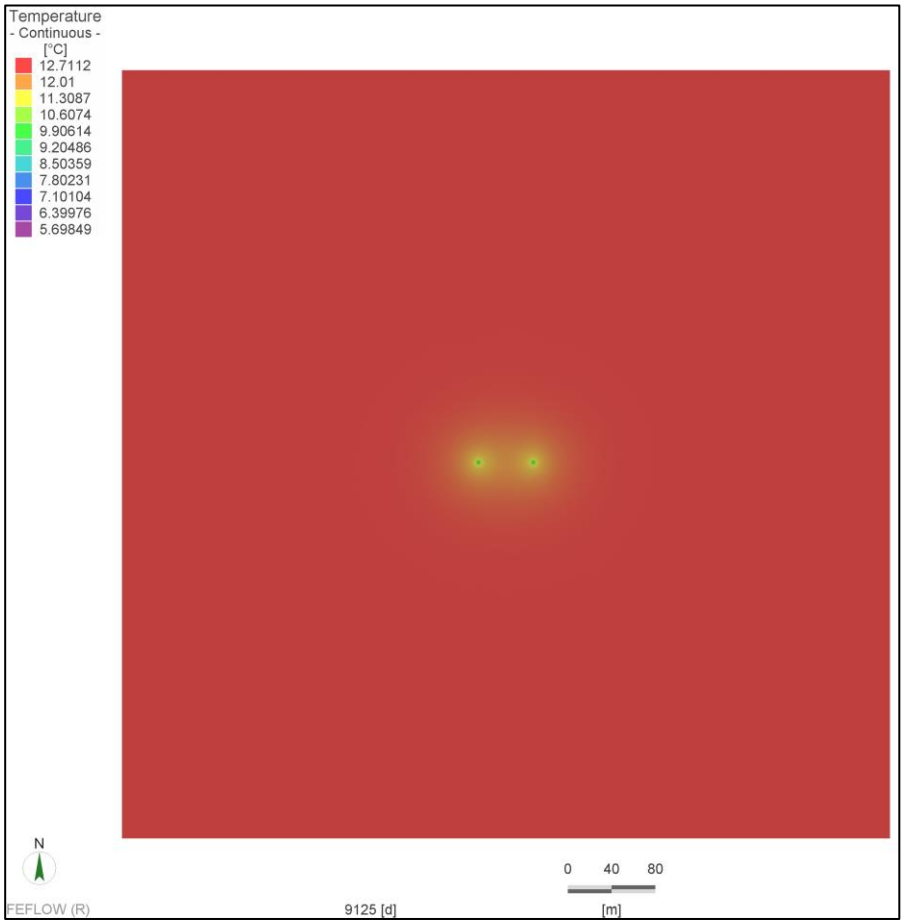



**Abbildung 76: Modellbetrieb C, Standort Z, 30 kW-Wärmepumpe – Temperaturverhältnisse im GWL nach 25 Jahren (mitteltiefe Erdwärmesonden)**

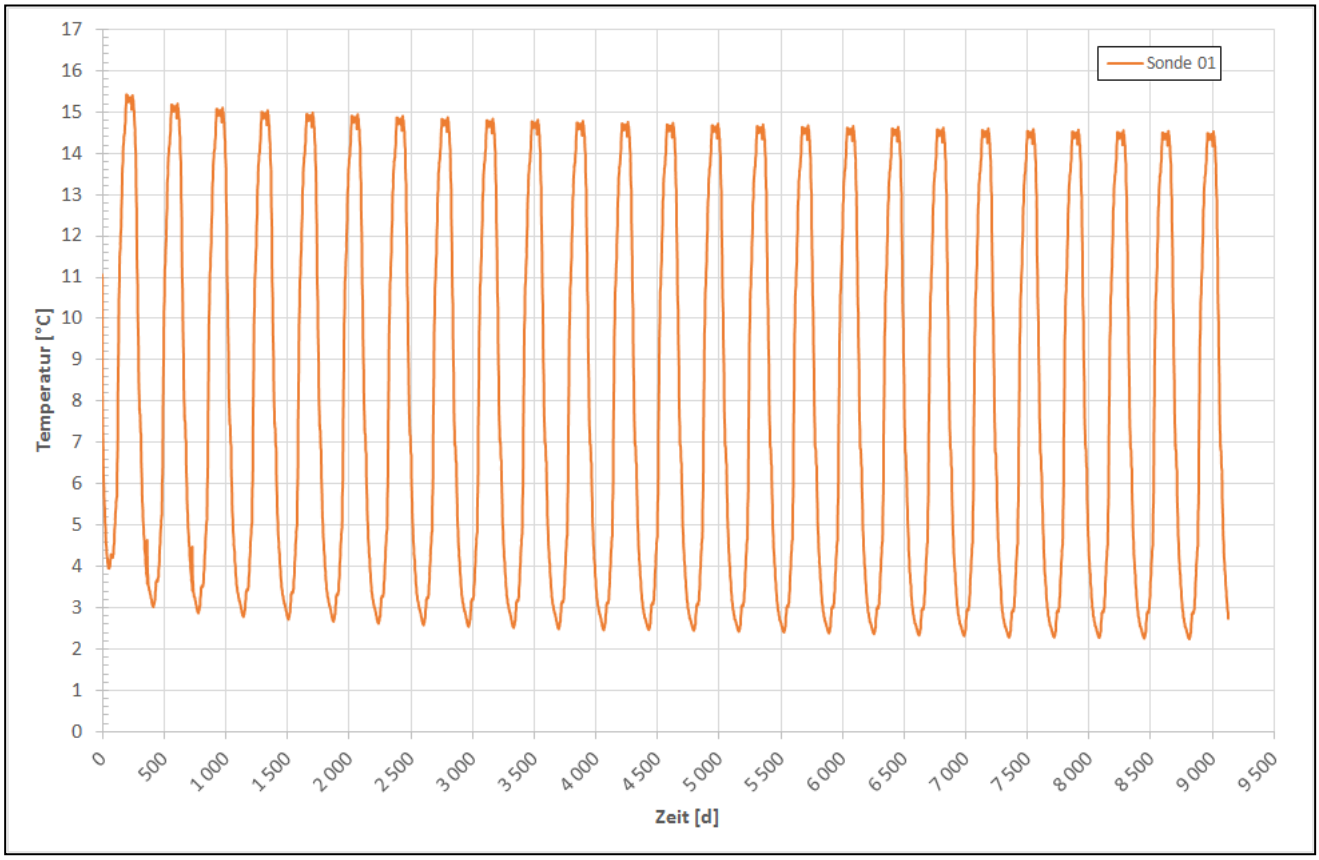



**Abbildung 77: Modellbetrieb C, Standort Z, 30 kW-Wärmepumpe – Entwicklung der Fluidtemperaturen in 25 Jahren (mitteltiefe Erdwärmesonden)**

Die langjährig mittlere Entzugsleistung liegt bei ca. 27,6 W/m. Unter Beachtung der erheblichen jährlichen Laufzeit der Wärmepumpe von mehr als 4.600 Stunden (bivalent paralleler Betrieb) handelt es sich hier um einen sehr guten Wert. Die sommerliche Rückführung solarer Wärmegewinne aus dem Gewächshauskomplex zurück in den Untergrund wirkt sich hier positiv aus (Verringerung der Gesamtbohrmeter gegenüber ausschließlichem Heizbetrieb).

#### 7.2.3.3 Ergebnisse Variante II – Grundlastabdeckung 70 kW-Wärmepumpe

**Oberflächennahe Erdwärmesonden**

Im Ergebnis der Modellrechnungen erwies sich eine oberflächennahe Erdwärmesondenanlage, bestehend aus **12 Erdwärmesonden zu je 135 m Endteufe (1.620 Bohrmeter)** als ausreichend zur Abdeckung der geforderten Lasten. Die räumliche Anordnung der Sonden im Betriebsgelände enthält die Abbildung 46 im Anlagenband (4.3.3).

Nach einer Simulationszeit von 25 Jahren werden mittlere Fluidtemperaturen von 0,8 °C berechnet. Die räumliche Ausbreitung der Temperaturfront und der zeitliche Verlauf der Fluidtemperaturen sind in Abbildung 47 bzw. Abbildung 48 des Anlagenbandes (4.3.3) dargestellt.

Unter Bezugnahme auf die erbrachte Jahresheizarbeit und Heizleistung ergibt sich eine Betriebsstundenzahl von 3.102 h. Die langjährig mittlere Entzugsleistung liegt im Ergebnis der Auslegung der Wärmequelle bei ca. 31,8 W/m.

Im Vergleich mit den Modellstandorten X und Y ist jedoch auch bei Beachtung der 70 kW-Wärmepumpe die höchste Bohrmeterzahl am Standort Z zu verzeichnen. Die Ursache wurde bereits im vorangestellten Kapitel erläutert.

#### Mitteltiefe Erdwärmesonden

Unter Beachtung einer Wärmequelle aus mitteltiefen Erdwärmesonden zeigte sich im Ergebnis der Modellierungen die Anzahl von **3 Erdwärmesonden zu je 430 m Endteufe (1.290 Bohrmeter)** als ausreichend zur Abdeckung der geforderten Lasten. Die räumliche Anordnung der Sonden im Betriebsgelände enthält die Abbildung 49 im Anlagenband (4.3.3). Im Vergleich mit den oberflächennahen Erdwärmesonden werden somit 330 Bohrmeter weniger benötigt.

Nach einer Simulationszeit von 25 Jahren werden mittlere Fluidtemperaturen von 0,7 °C berechnet. Die räumliche Ausbreitung der Temperaturfront und der zeitliche Verlauf der Fluidtemperaturen sind in Abbildung 50 und Abbildung 51 des Anlagenbandes (4.3.3) zu sehen.

Die langjährig mittlere Entzugsleistung liegt im Ergebnis der Auslegung der Wärmequelle bei ca. 40 W/m.

## 7.3 Investitionskosten und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

### 7.3.1 Entwicklung der Energiekosten

Eine wichtige Randbedingung für objektive Betrachtungen zur wirtschaftlichen Realisierbarkeit einzelner Nutzungskonzepte stellt die Preisentwicklung einzelner Energieträger dar. In der Tabelle 17 wurde bereits für den Modellbetrieb A die Entwicklung der Energiekosten für die letzten 10 Jahre zusammengestellt. Zudem sind dort prognostische Entwicklungsoptionen einer Verteuerung/Verbilligung um je 30 % mit dargestellt. Diese liegen den Berechnungen für den Modellbetrieb C ebenfalls zugrunde.

### 7.3.2 Investitionskosten

Weil es sich beim Modellbetrieb C um einen Neubau handelt, sind nicht allein die Kosten für die Herstellung des Heizungssystems relevant. Folglich wurden im Ergebnis der Objektplanung auch die Kosten für die bauliche Realisierung des gesamten Gewächshauskomplexes mit berücksichtigt. Erschließungskosten sind aufgrund der extrem verschiedenen Standortbedingungen nicht mit enthalten.

In der folgenden Tabelle sind die Ergebnisse der Kostenschätzung der Bauwerkskonstruktion zusammengefasst. Dabei erfolgte eine Untergliederung in zusammenhängende Baugruppen und die Zuordnung zu den entsprechenden Kostengruppen.

**Tabelle 42: Kostenschätzung Gewächshausanlage – Modellbetrieb C**

| Kostengruppe | Baugruppe | Schätzkosten |
|---|---|---|
| 300 | Bauwerkskonstruktion | |
| 320 | Gründung | |
| | Punktfundamente (inkl. Aushub) | 12.285,00 € |
| | Streifenfundamente (inkl. Aushub und Schalung) | 10.230,00 € |
| | Erdarbeiten Grundleitungen (RW) | 5.700,00 € |
| | Erdarbeiten Grundleitungen (AW) | 3.000,00 € |
| | Bodenaushub für Ringerder | 1.900,00 € |
| | Unterbau Gewächshausfläche | 24.570,00 € |
| | Bodenplatten (inkl. Hartkorneinstreu) | 67.900,00 € |
| | Verbundpflasterfläche | 43.350,00 € |
| | Betonfußboden, wärmegedämmt | 3.266,00 € |
| | Grundbeet + Bändchengewebe | 4.178,00 € |
| 330-370 | Gewächshauskonstruktion Produktionsbereich (inkl. Montagehilfsprofile + Lüftungsklappen) | 176.205,00 € |
| | Gewächshauskonstruktion Verkaufsbereich (inkl. Montagehilfsprofile + Lüftungsklappen) | 69.120,00 € |
| | Rolltor | 4.500,00 € |
| | Außentüren | 17.500,00 € |
| | Innentüren | 13.500,00 € |
| | Eindeckung Dach Alltop SDP (inkl. Thermosprossen) | 172.380,00 € |
| | Eindeckung Steh- und Giebelwände (S4P) inkl. Thermosprossen | 89.080,00 € |
| | Eindeckung Trennwände (Alltop-Qualität) | 30.680,00 € |
| | Büro- und Lagerräume | 41.580,00 € |
| | Sanitärbereiche | 11.360,00 € |
| | Sockel, wärmegedämmt, Isopaneele 60 mm | 4.017,00 € |
| | **Summe Kostengruppe 300:** | **806.841 €** |
| 400 | Bauwerk – technische Anlagen | |
| 410 | Regenwasserspeichertank (300 m³) + Pumpensumpf + Revisions-schacht | 7.550,00 € |
| | RW-Sickerschacht (ausgelegt für ein Starkregen) | 16.800,00 € |
| | Tagesvorratsbehälter (50 m³) Höhe 3,12 m; Durchmesser 4,55 m | 3.100,00 € |
| | Manuelle Bewässerung | 3.993,00 € |
| | Offene Fließmatte inkl. Tropfschläuche | 5.376,00 € |
| | Anstausystem für Tische, geschlossen mit Rücklauf | 19.463,00 € |
| | Grundleitungen (RW) | 3.800,00 € |
| | Grundleitungen (AW) | 2.000,00 € |
| 420 | Raumheizflächen | |

| Kostengruppe | Baugruppe | Schätzkosten |
|---|---|---|
| | Luftheizer | 12.672,00 € |
| | Fußbodenheizung | 9.676,00 € |
| | Untertischheizung | 14.238,00 € |
| | Brennstofflager, Mischergruppe Heizraum, Ringleitung | 5.000,00 € |
| | Zuleitungen, Pumpen, Mischergruppen im Gewächshaus | 8.000,00 € |
| 440 | Starkstromanlagen | 36.864,00 € |
| | Nutzungsspezifische Anlagen | |
| | Rolltische | 42.313,00 € |
| | 2-fach Energieschirm (Tagesschirm und Schattierung) | 52.992,00 € |
| 470 | Energieschirm Abteilung 2 | 8.064,00 € |
| | Verdunkelung Abteilung 2 | 16.128,00 € |
| | TwinRoll-Wand | 3.540,00 € |
| | Umluftventilatoren | 4.000,00 € |
| 480 | Gebäudeautomation | 24.576,00 € |
| | **Summe Kostengruppe 400** | **300.145,00 €** |
| | **Summe Kosten300 und 400** | **1.106.986,00 €** |
| 700 | Baunebenkosten (Genehmigungen, Planungskosten, u.a.) 15% | 166.047,90 € |
| | **Summe netto Investkosten** | 1.273.033,90 € |
| | **Mehrwertsteuer** | 241.876,44 € |
| | **Summe brutto Investkosten** | 1.514.910,34 € |

Die Kostenschätzung für die Wärmeerzeugungsanlage inkl. Abgasanlagen und hydraulischer Einbindung (Kostengruppe 420) ist für die betrachteten Varianten der Wärmeerzeugung in der Tabelle 43 dargestellt. Unter Beachtung der verschiedenen geothermischen Nutzungsoptionen erfolgt in der Tabelle 44 eine separate Aufführung der Schätzkosten für die geothermische Wärmeerzeugung (Wärmequelle einschließlich Wärmepumpe). Die geothermischen Wärmequellensysteme sind darüber hinaus im Anlagenband (5.3.1) noch einmal detailliert hinsichtlich ihrer technischen Spezifikation und der jeweiligen Kostenanteile zusammengestellt.

Die Gesamtkosten sind in Tabelle 45 bis Tabelle 47 zusammengefasst. Dargestellt sind jeweils die Kosten für die geothermische Erschließung mit oberflächennahen Erdwärmesonden, mitteltiefen Erdwärmesonden und über eine Brunnenanlage sowie die kalkulierten Aufwendungen für den gesamten Neubau.

Generell ist zu betonen, dass die Grundlastabdeckung jeweils geothermisch erfolgt, als Spitzenlastkessel jedoch Heizöl angesetzt wurde. Die Kesselanlage ist hier zwar etwas teurer als die vergleichbare Variante mit Erdgas (Kostenunterschied: 15.000 €), jedoch ist zu beachten, dass die Kosten für die Erdgaserschließung generell nicht eingerechnet sind. Der scheinbare Kostenvorteil einer Spitzenlastabdeckung über Erdgas kann somit sehr leicht durch den Erschließungsaufwand übertroffen werden. Folglich ist für die Spitzenlastabdeckung die „sicherere“ Prognosevariante über Heizöl gewählt worden.

**Tabelle 43: Kostenschätzung Wärmeerzeugungsanlage inkl. Abgasanlagen und hydraulische Einbindung (Kostengruppe 420) Modellbetrieb C**

| Variante Wärmeerzeugung | Leistungsaufteilung | | Pufferspeicher (m³) | Kosten (€, netto) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | WP (kW) | Kesselanlage (kW) | | WP | Kesselanlage | Pufferspeicher |
| **monovalent Heizöl** | -- | 270 | -- | -- | 52.000 | -- |
| **monovalent Erdgas** | -- | 270 | -- | -- | 34.000 | -- |
| **monovalent Steinkohle** | -- | 270 | 30 | -- | 85.700 | 25.000 |
| **monovalent Pellets** | -- | 270 | 30 | -- | 94.800 | 25.000 |
| **Elektro Wärmepumpe + Heizöl** | 70 | 200 | 10 | [1)] | 40.000 | 15.000 |
| | 30 | 240 | 10 | [1)] | 49.000 | 15.000 |
| **Elektro Wärmepumpe + Erdgas** | 70 | 200 | 10 | [1)] | 25.000 | 15.000 |
| | 30 | 240 | 10 | [1)] | 34.000 | 15.000 |

[1)] Detailaufgliederung gemäß nachfolgender Tabelle

**Tabelle 44: Kostenschätzung Wärmepumpenanlage inkl. geothermischer Erschließung für die Standorte Dresden, Leipzig und Chemnitz bei unterschiedlichen Nutzungsvarianten – Modellbetrieb C**

| Geothermische Nutzungsvariante | Kosten Wärmepumpe inkl. geothermische Erschließung (€, netto) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Standorte | | | | | |
| | Raum Dresden/Meißen | | Raum Leipzig | | Raum Chemnitz | |
| | Leistung Wärmepumpe | | | | | |
| | 70 kW | 30 kW | 70 kW | 30 kW | 70 kW | 30 kW |
| **Oberflächennahe Erdwärmesonden** | 89.983 | 53.109 | 111.467 | 61.285 | 128.961 | 68.158 |
| **Mitteltiefe Erdwärmesonden** | 261.637 | 161.935 | 270.628 | 152.558 | 307.645 | 191.403 |
| **Brunnenanlagen** | 228.312 | 153.076 | 264.151 | 175.508 | nicht möglich | nicht möglich |

**Tabelle 45: Investitionskosten Gewächshausneubau und geothermische Erschließung (gesamt) – oberflächennahe Erdwärmesonden – Modellbetrieb C**

| Investitionskosten (€, netto) | Oberflächennahe Erdwärmesonden | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Standorte | | | | | |
| | Raum Dresden/Meißen | | Raum Leipzig | | Raum Chemnitz | |
| | Leistung Wärmepumpe | | | | | |
| | 70 kW | 30 kW | 70 kW | 30 kW | 70 kW | 30 kW |
| **Gewächshausneubau** | 1.273.033 | | | | | |
| **Pufferspeicher inkl. Einbindung (10 m³)** | 15.000 | | | | | |
| **Spitzenlastkessel (Heizöl)** | 40.000 | 49.000 | 40.000 | 49.000 | 40.000 | 49.000 |
| **Geothermische Erschließung** | 89.983 | 53.109 | 111.467 | 61.285 | 128.961 | 68.158 |
| **Investitionskosten netto, gesamt (€)** | 1.418.016 | 1.390.142 | 1.439.500 | 1.398.318 | 1.456.994 | 1.405.191 |

**Tabelle 46: Investitionskosten Gewächshausneubau und geothermische Erschließung (gesamt) – mitteltiefe Erdwärmesonden – Modellbetrieb C**

| Investitionskosten (€, netto) | Mitteltiefe Erdwärmesonden | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Standorte | | | | | |
| | Raum Dresden/Meißen | | Raum Leipzig | | Raum Chemnitz | |
| | Leistung Wärmepumpe | | | | | |
| | 70 kW | 30 kW | 70 kW | 30 kW | 70 kW | 30 kW |
| **Gewächshausneubau** | 1.273.033 | | | | | |
| **Pufferspeicher inkl. Einbindung (10 m³)** | 15.000 | | | | | |
| **Spitzenlastkessel (Heizöl)** | 40.000 | 49.000 | 40.000 | 49.000 | 40.000 | 49.000 |
| **Geothermische Erschließung** | 261.637 | 161.935 | 270.628 | 152.558 | 307.645 | 191.403 |
| **Investitionskosten netto, gesamt (€)** | 1.589.670 | 1.498.968 | 1.598.661 | 1.498.591 | 1.635.678 | 1.528.436 |

**Tabelle 47: Investitionskosten Gewächshausneubau und geothermische Erschließung (gesamt) – Brunnenanlagen – Modellbetrieb C**

| Investitionskosten (€, netto) | Brunnenanlagen | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Standorte | | | | | |
| | Raum Dresden/Meißen | | Raum Leipzig | | Raum Chemnitz | |
| | Leistung Wärmepumpe | | | | | |
| | 70 kW | 30 kW | 70 kW | 30 kW | 70 kW | 30 kW |
| **Gewächshausneubau** | 1.273.033 | | | | | |
| **Pufferspeicher inkl. Einbindung (10 m³)** | 15.000 | | | | | |
| **Spitzenlastkessel (Heizöl)** | 40.000 | 49.000 | 40.000 | 49.000 | 40.000 | 49.000 |
| **Geothermische Erschließung** | 228.312 | 153.076 | 264.151 | 175.508 | nicht möglich | nicht möglich |
| **Investitionskosten netto, gesamt (€)** | 1.556.345 | 1.490.109 | 1.592.184 | 1.512.541 | -- | -- |

Im Ergebnis der Betrachtungen wird deutlich, dass die oberflächennahen Erdwärmesondenanlagen jeweils die kostengünstigste Variante darstellen. Für die Variante mit 70 kW-Wärmepumpe liegen die Gesamtinvestkosten für die

- Region X bei minimal ca. 1,42 Mio. Euro, für die
- Region Y bei minimal ca. 1,44 Mio. Euro und für die
- Region Z bei minimal ca. 1,46 Mio. Euro.

Die Unterschiede zwischen den Standorten sind somit nur minimal.

Für die Variante mit 30 kW-Wärmepumpe liegen die Gesamtinvestkosten für die

- Region X bei minimal ca. 1,39 Mio. Euro, für die
- Region Y bei minimal ca. 1,4 Mio. Euro und für die
- Region Z bei minimal ca. 1,41 Mio. Euro.

Auch hier sind die Kostenunterschiede zwischen den Regionen gering. Zudem ist auch im Vergleich mit der 70 kW-Variante kein deutlicher Unterschied vorhanden.

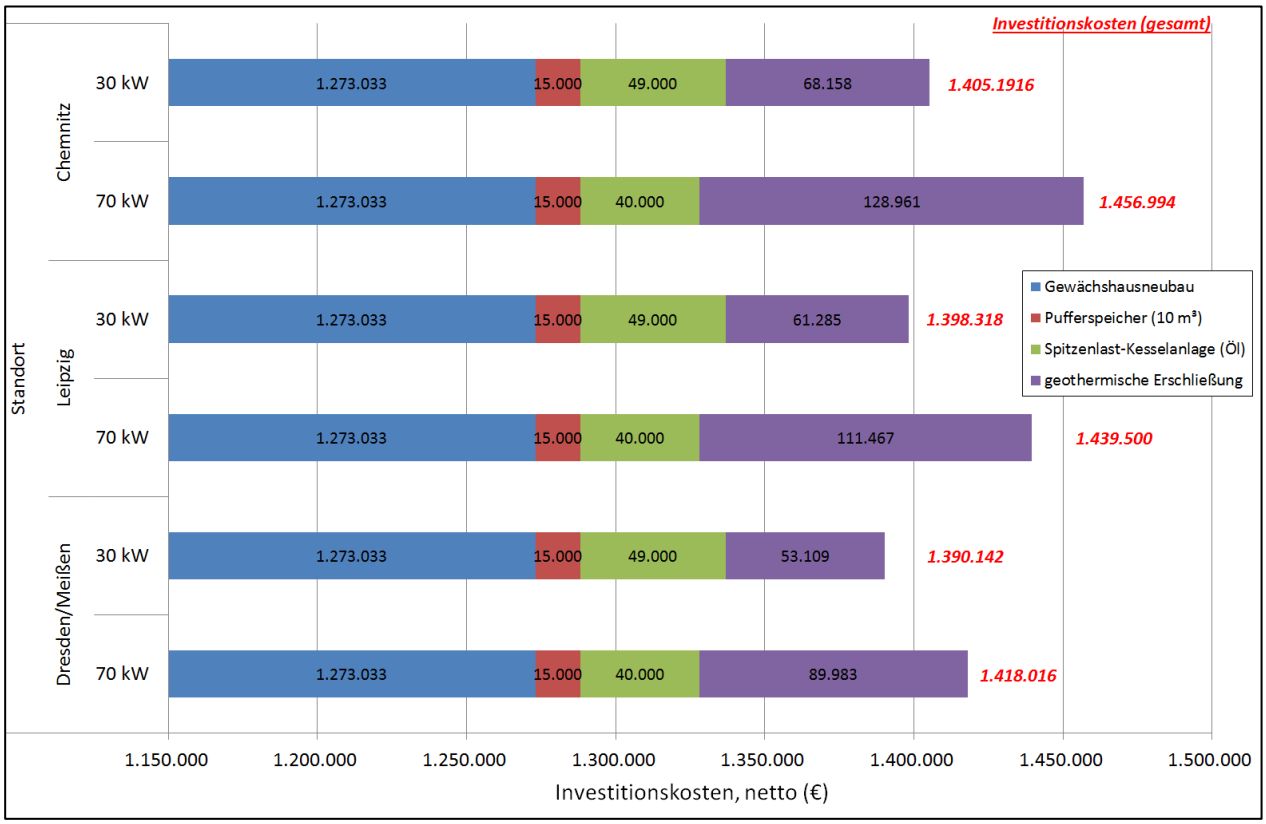



**Abbildung 78: Modellbetrieb C – Übersicht der gesamten Investitionskosten (netto) für die Nutzung oberflächennaher Erdwärmesonden**

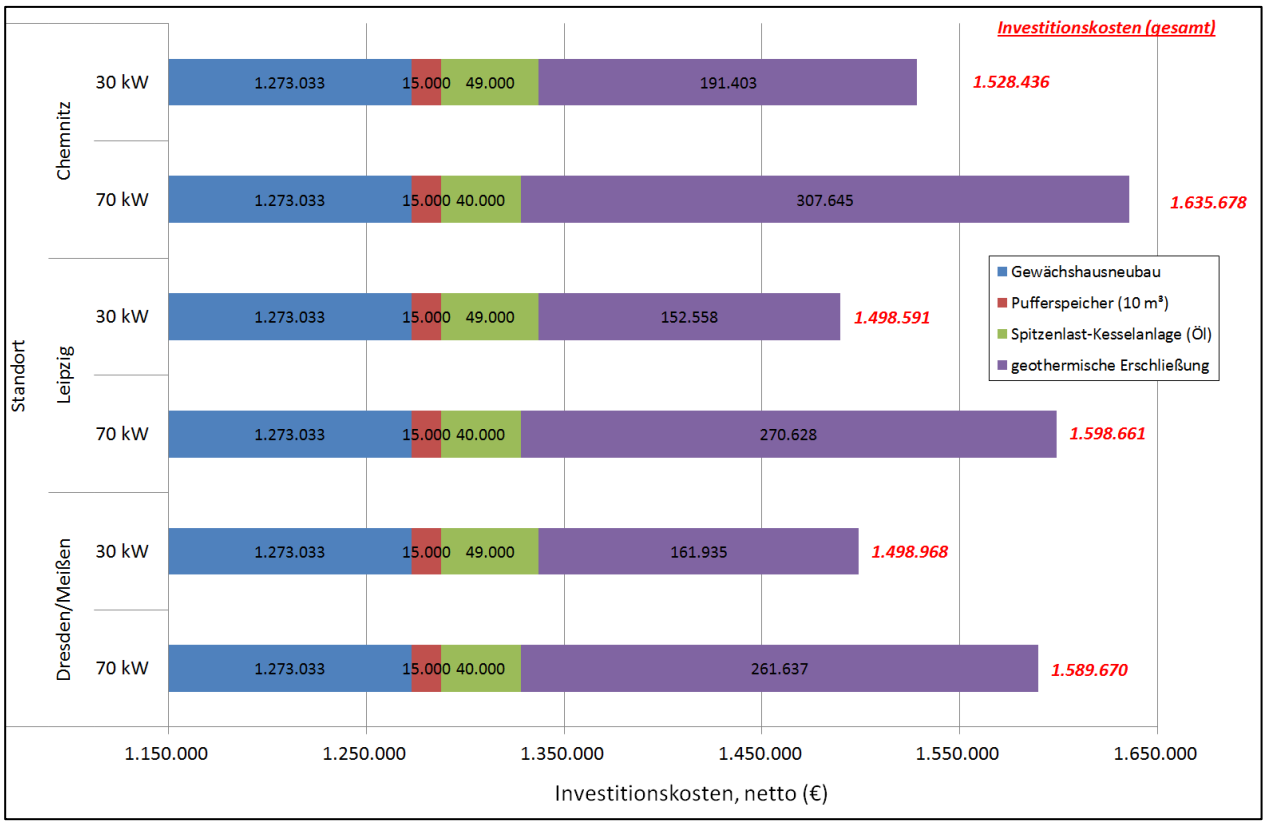



**Abbildung 79: Modellbetrieb C – Übersicht der gesamten Investitionskosten (netto) für die Nutzung mitteltiefer Erdwärmesonden**

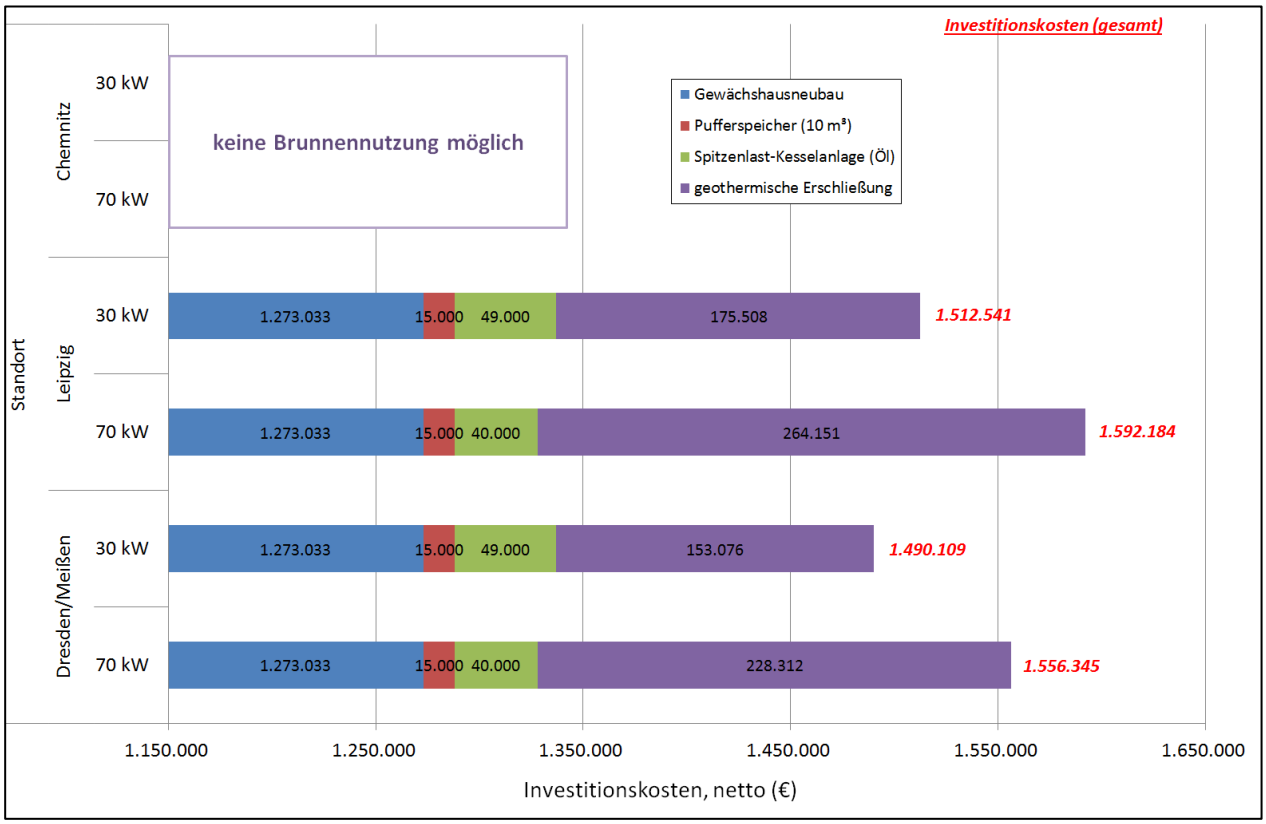



**Abbildung 80: Modellbetrieb C – Übersicht der gesamten Investitionskosten (netto) für die Nutzung über Brunnenanlagen**

### 7.3.3 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung Modellbetrieb C

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zum Modellbetrieb C ist für die verschiedenen Optionen der Beheizung im Anlagenband (5.3.2) zusammengefasst.

Wie zu erkennen ist, sind für die geothermischen Nutzungsoptionen der

- mitteltiefen Erdwärmesonden und der
- geothermischen Brunnenanlagen

praktisch keine Möglichkeiten einer wirtschaftlichen Nutzung abzuleiten.

#### Mitteltiefe Erdwärmesonden

Unter Beachtung der Kostenstruktur bei Nutzung mitteltiefer Erdwärmesonden ist die konventionelle Beheizung über Steinkohle oder Erdgas mit Abstand am günstigsten. Je nach Entwicklung der Energiepreise ist auch die alleinige Nutzung von Heizöl noch kostengünstiger als ein bivalentes System unter Einbeziehung der Geothermie (Ausnahme: Entwicklung der Energiepreise fällt 30 % höher aus als bisher). Allein monovalent betriebene Pelletanlagen liegen beim Blick auf die jährlichen Heizkosten in einem ähnlichen Bereich wie die bivalenten Systeme.

Beim Blick auf die Amortisationszeit wird jedoch deutlich, dass diese nur im Vergleich einer Pelletanlage mit dem bivalenten System Erdgas/Wärmepumpe und auch nur für die Regionen X und Y unter 15 Jahren liegt. Für alle anderen Beheizungsoptionen liegt die Amortisationszeit weit darüber. Weil es sich beim Betrieb C jedoch um einen Neubau handelt und daher der Vergleichsmaßstab einer ohnehin sehr teuren Pelletanlage unrealistisch ist, kann hinsichtlich der wirtschaftlichen Realisierbarkeit der mitteltiefen Erdwärmesonden nicht

von einer entsprechend günstigen Prognose ausgegangen werden. Insbesondere die Kosten für die Errichtung der Sondenanlage (und somit die kapitalgebundenen Betriebskosten) sind hier so hoch, dass eine wirtschaftlich sinnvolle Nutzung nicht möglich ist.

#### Geothermische Brunnenanlagen

Bei der Betrachtung der geothermischen Brunnenanlagen ergibt sich nahezu ein identisches Bild wie bei den mitteltiefen Erdwärmesonden. Nur der Vergleich monovalenter Pelletanlagen mit einem bivalenten System aus Erdgas und Wärmepumpe lässt für die Modellregionen X und Y (insbesondere bei den Varianten mit 30 kW-Wärmepumpe) eine wirtschaftliche Nutzung erwarten. Für die Modellregion Z sind ohnehin keine Brunnenanlagen möglich. Wie bereits im Zusammenhang mit den mitteltiefen Erdwärmesonden erläutert, sind die monovalenten Pelletanlagen bei einem Neubau ungeeignet. Auch wenn die jährlichen Heizkosten bei monovalenter Heizöl- und natürlich auch Pelletnutzung teilweise höher ausfallen als bei bivalenten Systemen unter Einbeziehung der Geothermie, sind die Amortisationszeiten aufgrund der erheblichen Herstellungskosten der Brunnenanlagen deutlich zu lang. Eine wirtschaftlich sinnvolle Nutzung ist somit auch für die geothermischen Brunnenanlagen nicht gegeben.

Hier ist jedoch noch einmal zu betonen, dass die notwendige Aufbereitung des Wassers einen erheblichen Kostenfaktor bei der Errichtung und im Betrieb darstellt. Sollten im Einzelfall günstigere chemische Verhältnisse im Grundwasser vorliegen, die keine Aufbereitung erfordern, kann die Nutzung geothermischer Brunnenanlagen ein überaus interessantes System darstellen.

#### Oberflächennahe Erdwärmesonden

Bei der Betrachtung der oberflächennahen Erdwärmesonden zeigt sich ein abweichendes Bild im Vergleich mit den vorgenannten Systemen. Zwar ist auch hier die monovalente Nutzung von Erdgas bzw. Steinkohle mit Abstand am preiswertesten, im Vergleich zum Heizöl bzw. zu Pellets bilden sich jedoch vielfach wirtschaftliche Realisierungskonzepte ab.

Für die Modellregion X ist das System aus Wärmepumpe und Erdgas sogar preiswerter als eine monovalente Pelletanlage (gilt für die 30 und 70 kW Wärmepumpe). In den Modellregionen Y und Z gilt dies nur bei Nutzung der 30 kW-Wärmepumpe, obgleich auch die Varianten mit 70 kW-Wärmepumpen sehr geringe Amortisationszeiten aufweisen (weniger als drei Jahre).

Die wirtschaftlichsten Ergebnisse werden (neben dem Vergleich mit der Pelletanlage) bei der Betrachtung einer reinen Heizölanlage im Vergleich mit der Kombination aus Heizöl (Spitzenlast) und Wärmepumpe (Grundlast) erzielt. Hier liegt die Amortisationszeit für (fast) alle betrachteten Varianten meist deutlich unter 15 Jahren, in der Regel sogar unter 10 Jahren. Bei gleichbleibendem Kostenanstieg der Energieträger oder einer Verteuerung stellt sich die Wirtschaftlichkeit besonders gut dar.

## 7.4 Fördermöglichkeiten

### 7.4.1 Staatliche Förderung

Bei Modellstandort C handelt es sich um den Neubau eines Gewächshauses. Eine BAFA-Förderung (Erläuterung siehe z. B. Kapitel 5.4.1) ist somit für die Modellbetriebe C nicht möglich (nur Förderung Bestandsbau). Auch aus den KfW-Förderprogrammen „Erneuerbare Energien Premium“ und „Tiefengeothermie“ ergibt sich keine Aussicht auf Förderfähigkeit (siehe auch hier Kapitel 5.4.1). Für den Modellbetrieb C ist somit eine staatliche Förderung der geothermischen Anlage nicht realistisch.

### 7.4.2 Sonstige Förderung

Neben der staatlichen Förderung besteht eine weitere, „indirekte“ Förderung in der Bezugsmöglichkeit vergünstigter Strompreise der Energieversorger. Hier sind zur Berechnung die Tarife der Envia Mitteldeutsche Energie AG angesetzt worden (Wärmepumpentarif und „normaler“ Tarif Ökostrom):

- Wärmepumpentarif Envia M: 16,2 Cent/kWh (netto)
- Tarif Profistrom 24 h (100 % Ökostrom): 19,0 Cent/kWh (netto)

## 7.5 Fazit Modellbetrieb C

Für den Modellbetrieb C wurde in Anlehnung an das Nutzungsprofil des Modellbetriebs A ein energetisch optimierter Gewächshausneubau konzipiert. Das Gewächshaus in Venlo-Blockbauweise verfügt über vier Produktionsabteile mit einer Nutzfläche von 1.612,8 m². Insgesamt liegt die Bruttogrundfläche bei ca. 2.458 m².

Die berechnete, insgesamt erforderliche Heizleistung beträgt 240 kW (Heizarbeit: 238.057 kWh im Jahr). Es sind zwei verschiedene Grund- und Spitzenlastszenarien – beide für bivalent parallelen Betrieb – untersucht worden:

- Variante I: Heizleistung der Wärmepumpe von 30 kW (Abdeckung der Jahresheizarbeit von 59 %)
- Variante II: Heizleistung der Wärmepumpe von 70 kW (Abdeckung der Jahresheizarbeit von 91 %)

Für alle drei Modellregionen wurde die Realisierbarkeit aller drei Wärmequellensysteme untersucht (oberflächennahe und mitteltiefe Erdwärmesonden, Brunnenanlagen). Mit Ausnahme der Brunnenanlagen am Standort Z sind aus technischer Sicht alle Wärmequellensysteme an jedem Standort möglich.

Im Ergebnis der Betrachtungen wird deutlich, dass die oberflächennahen Erdwärmesondenanlagen jeweils die kostengünstigste Variante darstellen. Für die Variante mit 70 kW-Wärmepumpe liegen die Gesamtinvestkosten im Mittel bei ca. 1,44 Mio. Euro, für die Variante mit 30 kW-Wärmepumpe sind die geschätzten Kosten fast analog (im Mittel ca. 1,4 Mio. Euro). Es gibt somit hinsichtlich der reinen Kosten für die Gesamtinvestition kaum Unterschiede zwischen beiden Varianten. Dies gilt auch beim Vergleich der Standorte untereinander.

Bei gesamtheitlicher Wirtschaftlichkeitsbetrachtung, auch im Vergleich mit konventionellen Energieträgern ergibt sich folgendes Bild:

Die monovalente Beheizung über Steinkohle oder Erdgas stellt die wirtschaftlichste Lösung dar. Bei Beibehaltung der Preisentwicklung der letzten Jahre liegen die Wärmegestehungskosten hier bei 0,142 €/kWh bzw. 0,15 €/kWh. Der jährliche $CO_2$-Ausstoß beider Varianten ist jedoch mit ca. 134 t bzw. 68 t höher als bei den bivalenten Systemen.

Reine Pelletkesselanlagen sind meist teurer als die bivalenten Versorgungskonzepte. Die Kombination aus Heizöl und oberflächennahen Erdwärmesonden ist im Vergleich mit einer monovalenten Heizölnutzung vielfach wirtschaftlich interessant. Trotz der Investitionskosten der Erdwärmeanlagen rechnen sich diese bivalenten Systeme (je nach Entwicklung der Energiekosten) oft nach etwa vier bis acht Jahren. So kann beispielsweise für die Modellregion X im direkten Vergleich einer monovalenten Heizölnutzung mit dem bivalenten System Heizöl/70 kW Wärmepumpe eine Amortisationszeit von 5,5 Jahren (bei gleichbleibender Entwicklung der Energiepreise) bzw. sogar nur 4,3 Jahren (bei weiterem Anstieg der Energiepreise um 30 %) ausgehalten

werden. Wärmepumpenanlagen, die auf mitteltiefen Erdwärmesonden oder geothermischen Brunnenanlagen basieren, sind generell nicht wirtschaftlich abbildbar. Im Anlagenband (5.3.2) ist dies für alle untersuchten Nutzungsszenarien noch einmal ausführlich grafisch dargestellt.

# 8 Modellbetrieb D

## 8.1 Betriebsplanung, Energiebedarfsberechnung und $CO_2$-Bilanz

**Grundlagen, Betriebsplanung**

Bei Modellbetrieb D handelt es sich analog zum Betrieb C um einen Gewächshausneubau. Ziel war es hier jedoch, im ersten Schritt eine optimale geothermische Nutzung zu ermitteln und darauf basierend ein geeignetes Nutzungskonzept/eine geeignete Nutzungskonzeption zu entwerfen. Randbedingung ist generell eine alleinige bzw. vollständige Nutzung der Geothermie für die Beheizung ohne ein zweites (konventionelles System).

Im Ergebnis der Betrachtungen zu den Modellbetrieben A bis C erwiesen sich die Unterschiede des geothermischen Potenzials zwischen den drei Modellregionen als minimal. In der Modellregion Z fallen die geschlossenen Entzugssysteme zwar immer etwas größer aus (vor allem aufgrund der kühleren Untergrundtemperaturen), jedoch ist auch hier der Unterschied eher moderat. Brunnenanlagen sind in der Modellregion Z gar nicht möglich.

Weil es sich beim Modellbetrieb D um einen Neubau mit geringen energetischen Anforderungen (minimaler Wärmebedarf) handelt, fallen die Wärmequellensysteme entsprechend kleiner aus als bei den bereits betrachteten Modellbetrieben. Es ist somit bereits im Vorfeld als sicher zu bewerten, dass eine Brunnenanlage allein aufgrund der hohen Kosten der Wasseraufbereitung nicht wirtschaftlich sein kann. Vor diesem Hintergrund wird beim Modellbetrieb D auf die Betrachtung der offenen Grundwassernutzung verzichtet. Sie stellt mit Sicherheit das teuerste System dar und bleibt daher bei der Betrachtung außen vor.

Somit stehen bei der Betrachtung der Wärmequellen die beiden geschlossenen Systeme (oberflächennahe bzw. mitteltiefe Erdwärmesonden) zur Verfügung. Auch im Ergebnis der Untersuchungen zu den Modellbetrieben A bis C sind dies die effektivsten/preiswertesten Systeme.

Grundsätzlich sind bei der Konfiguration des Modellbetriebs D zwei Herangehensweisen möglich. Die erste Variante besteht darin, einen sehr großen, modernen und maximal wärmegedämmten Betrieb zu planen (umfangreicher als Modellbetrieb C), der auch mit einer sehr großen Geothermieanlage ausgestattet ist. Der zweite Ansatz ist dazu exakt gegenteilig. Es ist ein vergleichsweise kleinerer Betrieb zu konzipieren, wobei hier der Fokus klar auf der Kostenoptimierung des Neubaus (einschließlich kostengünstiger geothermischer Wärmequelle) liegt.

Im Sinne der Realisierungswahrscheinlichkeit ist die zweite Variante eines kleineren, kostenoptimierten Neubaus mit sehr geringem Energiebedarf betrachtet worden.

Ein sinnvoller und effektiver Einsatz der Geothermie ist generell nur möglich, wenn die im Gewächshaus produzierten Kulturen (bzw. deren Wärmebedarf) auf die Wärmepumpennutzung zur Wärmeerzeugung angepasst werden. Des Weiteren soll die Auswahl der Eindeckmaterialien und die technische Ausstattung des Gewächshauses so gewählt werden, dass eine hohe Wärmedämmung zu einem möglichst geringen Investitionsbetrag realisiert werden kann, weil die Investitionen für die Wärmeerzeugungsanlage inklusive der geothermischen Erschließung auch bei kleinstmöglicher Auslegung bereits ein hohes Investitionsvolumen mit sich bringen.

Bei der konzipierten und nachfolgend beschriebenen Gewächshausanlage handelt es sich um ein Produktionsgewächshaus mit einer Kappenbreite von 4,80 m, einer Schiffbreite von 9,60 m und einer Traufhöhe von 5,00 m. Die Bruttogrundfläche des Modellbetriebes D beträgt 1.881,60 m². Vor dem Hintergrund der vorhandenen Betriebsstrukturen in Sachsen wurde angestrebt, eine weitestmöglich praxistaugliche Gewächshausanlage zu konzipieren. Ein Grundgedanke bei der Entwicklung dieser konzeptionellen Gewächshausanlage war somit, dass mit diesem Modellbetrieb auch eine nachträgliche und sinnvolle Integrierung dieses Gewächshauses in einen bereits bestehenden, eventuell historisch gewachsenen Produktionsbetrieb möglich ist.

Als Kulturen werden Bio-Tomaten als Sommerkultur und Bio-Feldsalat in den Wintermonaten vorgeschlagen, sodass das Gewächshaus im Winter bei einer Normaußentemperatur von -14 °C nur frostfrei (+1 °C) geheizt werden muss. Eine biologische Pflanzenproduktion wird deshalb präferiert, weil die gegenwärtige Nachfrage nach biologisch produziertem Gemüse aus der Region weiterhin steigt und demnach der Absatz der produzierten Waren vor allem für die Ballungsgebiete Chemnitz, Dresden und Leipzig als gesichert eingestuft werden kann, vorausgesetzt, dass die produzierte Ware den Qualitätskriterien des Handels entspricht. Das Ziel war, einen Betriebsbereich zu schaffen, der auch in einen historisch gewachsenen Gartenbaubetrieb, wie er überwiegend in Sachsen vorkommt, eingegliedert werden kann. Unter Berücksichtigung der Lage der unterschiedlichen Gartenbaubetriebe in Sachsen kann die vorhandene Freifläche für Neubauten in den Betrieben den begrenzenden Faktor darstellen. Weil die Erschließung der geothermischen Anlage zusätzlich Platz in Anspruch nehmen kann, sollte die Gewächshausfläche nicht überdimensioniert werden. Die Fläche kann jedoch nach den Gegebenheiten vor Ort für jeden Gartenbaubetrieb angepasst werden.

Damit der Wärmebedarf für die Gewächshausanlage gesenkt werden kann, sollen neben dem Anbau von Kalthauskulturen Eindeckmaterialien (Stegdoppelplatte, PE-Doppelfolie) und sonstige technische Ausstattungen (Energieschirmanlage) verwendet werden, die den Wärmeverlust der Gewächshausanlage weiter minimieren. Für den Modellbetrieb D wurde für die Dacheindeckung aufgeblasene PE-Doppelfolie und für die Stehwand- und Giebelbereiche Stegdoppelplatten, 16 mm (inkl. thermisch getrennter Profile) ausgewählt. Die Vorteile der Stegdoppelplatten liegen hauptsächlich in der sehr guten Wärmedämmung. Es wurde als Dacheindeckmaterial die Standardgewächshausfolie aus Polyethylen (PE) gewählt, weil diese in den Anschaffungskosten um ein Vielfaches günstiger ist als die sehr hochwertigen und langlebigen Folien aus ETFE (Ethylen-Tetrafluorethylen-Copolymer), u. a. auch F-Clean genannt. Allerdings sollten die PE-Folien im Dachbereich ca. alle sechs bis acht Jahre erneuert werden.

Ein 2,50 m breiter Arbeitsweg aus Beton kann über zwei gegenüberliegende 2,40 m breite zweiflügelige Drehflügeltüren befahren werden und dient zur Bewerkstelligung aller notwendigen Pflege- und Erntearbeiten innerhalb des Gewächshauses. Um zusätzlich Fläche für die Unterbringung der Schaltschränke, der Druckerhöhungsstation, des Tagesvorratsbehälters u. a. zu schaffen, wird die Gewächshausfläche unmittelbar am Arbeitsweg um ein Binderfeld und ein Schiff erweitert (siehe Grundriss). Die Zufahrt der benötigten Maschinen und Geräte zur Bodenbearbeitung im Gewächshaus wird über 4 Tore (Höhe der Tore 2,50 m), die an der Giebelseite gegenüber dem Arbeitsweg installiert werden, ermöglicht. Für den ein- bzw. zweitriebigen Tomaten-

anbau, z. B. mit dem V-System, wird an den Montagehilfsprofilen (Gewächshausgiebeln) und an den Gitterbindern (abgehängt) ein Kulturspalier befestigt.

Als zusätzliche Wärmedämmmaßnahme wird ein einlagiger Wärmedämm- und Schattierschirm mit umlaufender Schürze im Rand- und Binderbereich, der tagsüber als Innenschattierung und nachts als Wärmedämmschirm nutzbar ist, installiert. Weil als Wärmequelle die oberflächennahe Geothermie (Erdwärmesonden) genutzt werden soll, werden für den gegenwärtigen Modellbetrieb D zwei Wärmepumpen à 60 kW thermische Leistung in einem 20'-Seecontainer installiert (kostengünstigste Lösung). Zur Optimierung der Wärmepumpenlaufzeiten und zur Speicherung von Niedertemperaturwärme wird ein 30 m³ Schichtenspeicher in unmittelbarer Nähe zur Wärmeerzeugungsanlage realisiert. Dieser Pufferspeicher wird auf einer Bodenplatte fixiert.

Als Heizregister sollen im gesamten Produktionsbereich Aluminium-Flügelrohre eingesetzt werden, die durch ihre hohe Wärmeabgabe für die Ausbringung von Niedertemperaturwärme prädestiniert sind. Die installierten Aluminium-Flügelrohre werden für die Sommerkultur (Tomate) zwischen den Tomatenreihen vertikal übereinander angeordnet und sind in der Höhe verstellbar. Für die Winterkultur (Feldsalat) werden die Aluflügelrohre horizontal nebeneinander angeordnet, um eine möglichst pflanzennahe Heizung realisieren zu können.

Die Pflanzenbewässerung erfolgt über eine in der Höhe verstellbare Düsenrohrbewässerung. Für die Sommerkultur (Tomate) werden die Düsenrohre auf Bügeln ca. 30 cm über dem Boden aufgeständert.

Die Begründung dieses Bewässerungssystems liegt in der gleichmäßigen Bewässerung des Bodens und der damit einhergehenden gleichmäßigen Mineralisation der N-Handelsdünger über die Sommermonate hinweg. Falls die Bewässerung über Tropfschläuche realisiert werden würde, könnten die Nachkulturen (hier Feldsalat) ungleichmäßige Bestände aufweisen und demnach Ertrags- und Qualitätseinbußen die Folge sein. Zur Bewässerung der Kulturen soll vorrangig Regenwasser verwendet werden. Falls Regenwasser nicht zur Verfügung steht, soll Trink- oder Brunnenwasser zur Bewässerung genutzt werden. Zur Regenwasserspeicherung wird ein 244 m³ großer Regenwasserspeichertank (rundes Stahl-Folien-Becken aus gewellten Stahlplatten) mit beschichtetem Bodenring (inkl. Auskleidung und Abdeckung) an der Giebelseite installiert. Dieser Regenwasserspeichertank wurde so konzipiert, dass das Regenwasser zweier durchschnittlicher Monate gespeichert werden kann. Ein zu realisierender Regenwasserversickerungsschacht dient dazu, bei Starkregen und gefülltem Regenwasserspeichertank das überschüssige Regenwasser zu versickern. Im Technikbereich des Gewächshauses wird ein 23 m³ großer Tagesvorratsbehälter (rundes Stahl-Folien-Becken aus gewellten Stahlplatten) installiert, der die 1,5-fache Menge des Tagesbedarfs (8 l/m² im Sommer für die Tomatenkultur) speichern kann. Der Tagesvorratsbehälter weist eine Behälterhöhe von 3,88 m und einen Behälterdurchmesser von 2,73 m auf. Im Tagesvorratsbehälter kann bei Bedarf das Trink- oder Brunnenwasser zugemischt werden. Während der Pflanzenproduktion im Gewächshaus wird das Regenwasser während der Nachtstunden mit einer möglichst geringen Pumpenleistung aus dem Regenwasserspeichertank in den Tagesvorratsbehälter gepumpt werden und durch die höheren Temperaturen im Gewächshaus im Winter auf pflanzenverträgliche Temperaturen erwärmt.

Für die Wärmebedarfsermittlung mit Hilfe des Wärmebedarfssimulationsprogramms HORTEX 4.1 wurden folgende Daten zugrunde gelegt (Tabelle 48):

**Tabelle 48: Grunddaten für die Wärmebedarfsermittlung – Modellbetrieb D**

| - | Abteilung 1 |
|---|---|
| Grundfläche (m²) | 1.881,6 |
| Stehwandlänge (m) | 48 |
| Giebelbreite (m) | 38,4 |
| Kappenbreite | 4,8 |
| Traufhöhe (m) | 5 |
| Dachwinkel (°) | 23 |
| Eindeckung Außenstehwand | Stegdoppel-platte (SDP) |
| Eindeckung Außengiebel | Stegdoppel-platte (SDP) |
| Eindeckung Dach | PE-Doppelfolie (aufgeblasen) |
| Energieschirm | einlagig, gering aluminisiert, gut dichtend |
| Auslegungstemperatur (°C) | 1 |
| Temperatur im Abtaufall (°C) | 12 |

Der generelle Aufbau des geplanten Gewächshauses wird in der Abbildung 81 dargestellt.

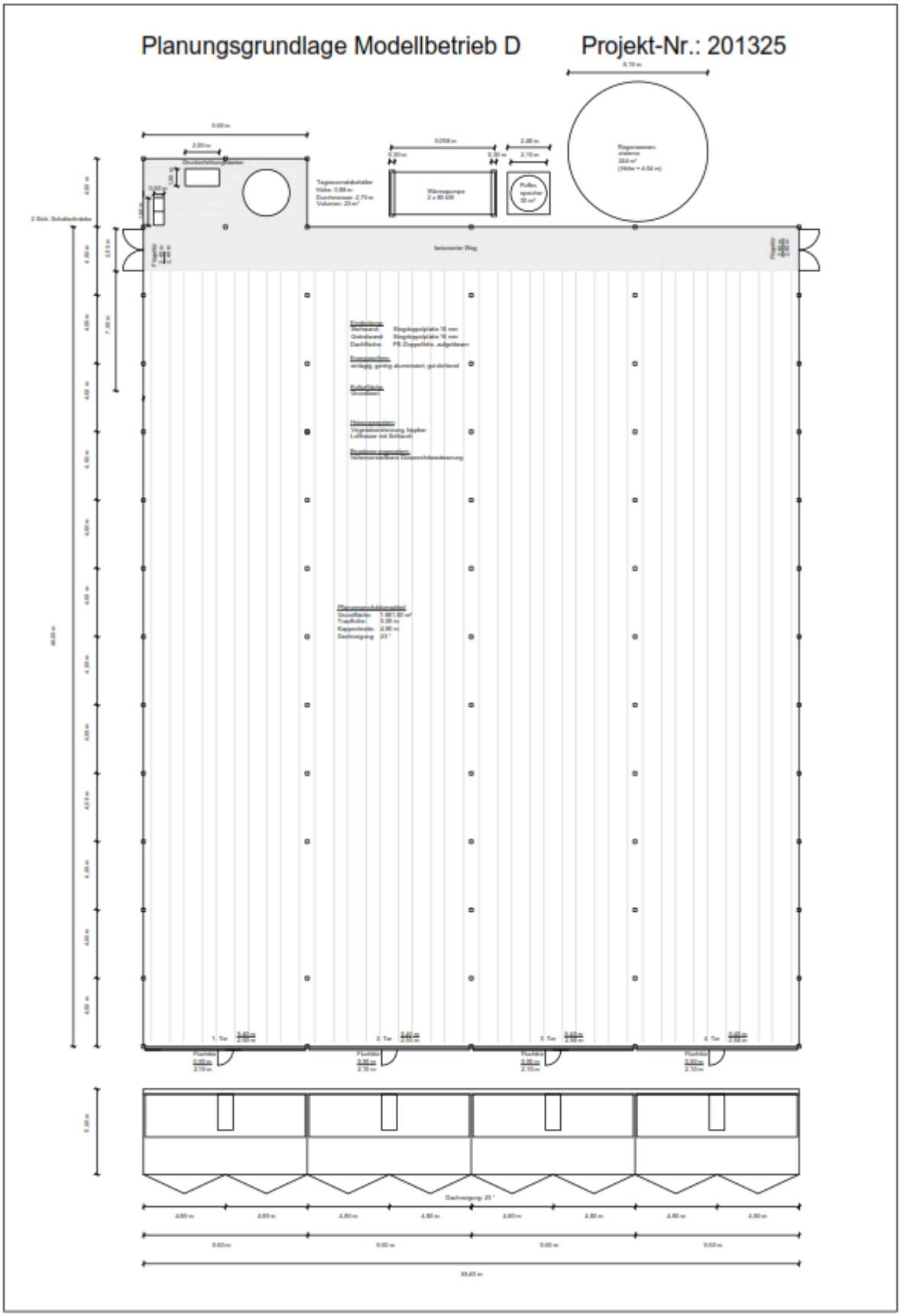



**Abbildung 81: Planungszeichnung Modellbetrieb D**

### Wärmebedarfsberechnung

Die Berechnungen zur Ermittlung der notwendigen Wärmeleistung und des Heizenergieverbrauchs wurden mit dem Simulationsprogramm HORTEX 4.1 durchgeführt. Die Ergebnisse der Simulationsrechnungen basieren auf den konstruktiven und technischen Daten der vorab beschriebenen Gewächshausanlage, den für die gärtnerische Produktion notwendigen Innentemperaturen und der Normaußentemperatur für den Standort der Gärtnerei (DIN 4701 bzw. EN 12831) im Testreferenzjahr (Jahresklimadatensatz GLOTESI). Die für die Simulationsrechnung zugrunde gelegten Temperaturprogramme sind in der Tabelle 49 zusammengestellt. Unter Berücksichtigung einer Normaußentemperatur am Standort der Gärtnerei von -14 °C (nach DIN 4701) und einer Auslegungstemperatur im Gewächshaus von 1 °C, errechnet sich unter Berücksichtigung der Temperaturprogramme eine notwendige Gesamtheizleistung für den Betrieb von 138 kW (Tabelle 50). Die Ergebnisse aller Simulationsrechnungen sind im Anlagenband (6.2.4) beigefügt.

**Tabelle 49: Temperaturprogramm Modellbetrieb D**

| - | Kalenderwoche | Sollwert Temperatur (°C) | | |
|---|---|---|---|---|
| | | Tag | Nacht | Lüftung |
| Abteilung 1 | 1-8 | 1 | 1 | 15 |
| | 9 | 1 | 1 | 25 |
| | 10-17 | 1 | 1 | 15 |
| | 18-19 | 1 | 1 | 25 |
| | 20-41 | 1 | 1 | 22 |
| | 42-52 | 1 | 1 | 15 |

**Tabelle 50: Ergebnisse der Simulationsberechnungen mit HORTEX 4.1 für den Modellbetrieb D**

| | Auslegungsleistung (kW) | Heizenergieverbrauch (kWh) | Heizenergieverbrauch (kWh pro m² und Jahr) |
|---|---|---|---|
| **Abteilung 1** | 138 | 21.318 | 11 |
| **Gesamt** | 138 | 21.318 | 11 |

Bei der Betrachtung der Tabelle 50 (benötigte Heizleistung in kW pro Stunde und Tag für den Modellbetrieb D) wird vor allem im Vergleich mit den Darstellungen zu den Modellbetrieben A bis C deutlich, dass bei einer Auslegungsleistung von weit über 100 kW nur eine sehr geringe Jahresheizarbeit von lediglich 21.000 kWh zu verrichten ist. Zudem treten die Leistungsanforderungen nur an den kälteren Wintertagen auf. Selbst in den Übergangsmonaten ist vielfach gar keine Heizanforderung vorhanden. Die erkennbaren, extrem kurzzeitig auftretenden Lastspitzen sind jedoch erforderlich, um das Gewächshaus frostfrei zu halten. Die gewählte Heizleistung der Wärmepumpe(n) von 120 kW liegt dabei leicht unter den Maximalanforderungen (Abdeckung der notwendigen Heizarbeit in Höhen von 99 %). Ein sehr kurzzeitiges Absinken der Temperatur unter den Auslegungswert wird daher in Kauf genommen. Weil kein konventionelles Spitzenlastsystem zur Verfügung steht, muss die gesamte notwendige Heizleistung geothermisch zur Verfügung gestellt werden.

Abbildung 82 zeigt die Jahresdauerlinie für den Modellbetrieb D auf der Basis der o. g. Auslegungsleistung der Wärmepumpe. Die grün hinterlegte Fläche stellt dabei auch hier die geothermische Abdeckung dar. Wie bereits oben erläutert, wird nahezu der komplette Energiebedarf (99 %) durch die Wärmepumpe abgedeckt. Zudem ist zu erkennen, dass die Leistungsanforderungen nur außerordentlich kurzzeitig auftreten.

Ein vereinfachtes Anlagenschema ist in der Abbildung 83 dargestellt. Hierbei ist (wie bei allen Betrieben) zu betonen, dass die Auswahl und Positionierung der Soleumwälzpumpen jeweils für den Einzelfall individuell angepasst werden muss.

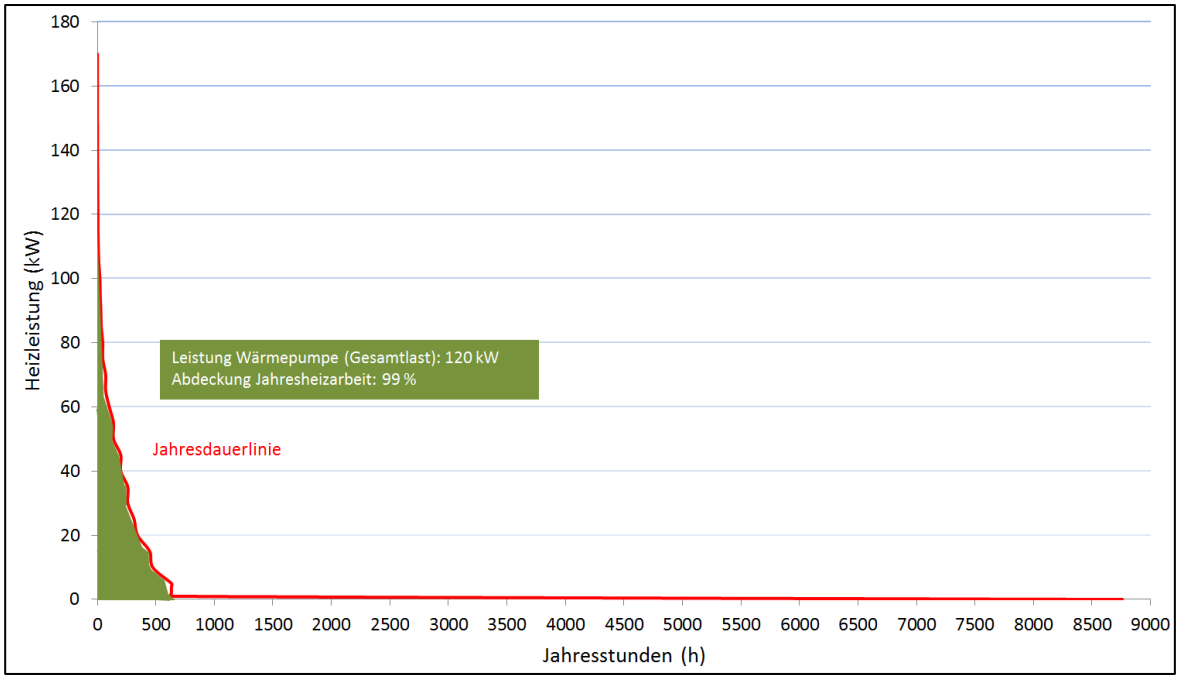



**Abbildung 82: Jahresdauerlinie mit Darstellung der Lastabdeckung (Betrieb D, 120 kW-Wärmepumpe)**

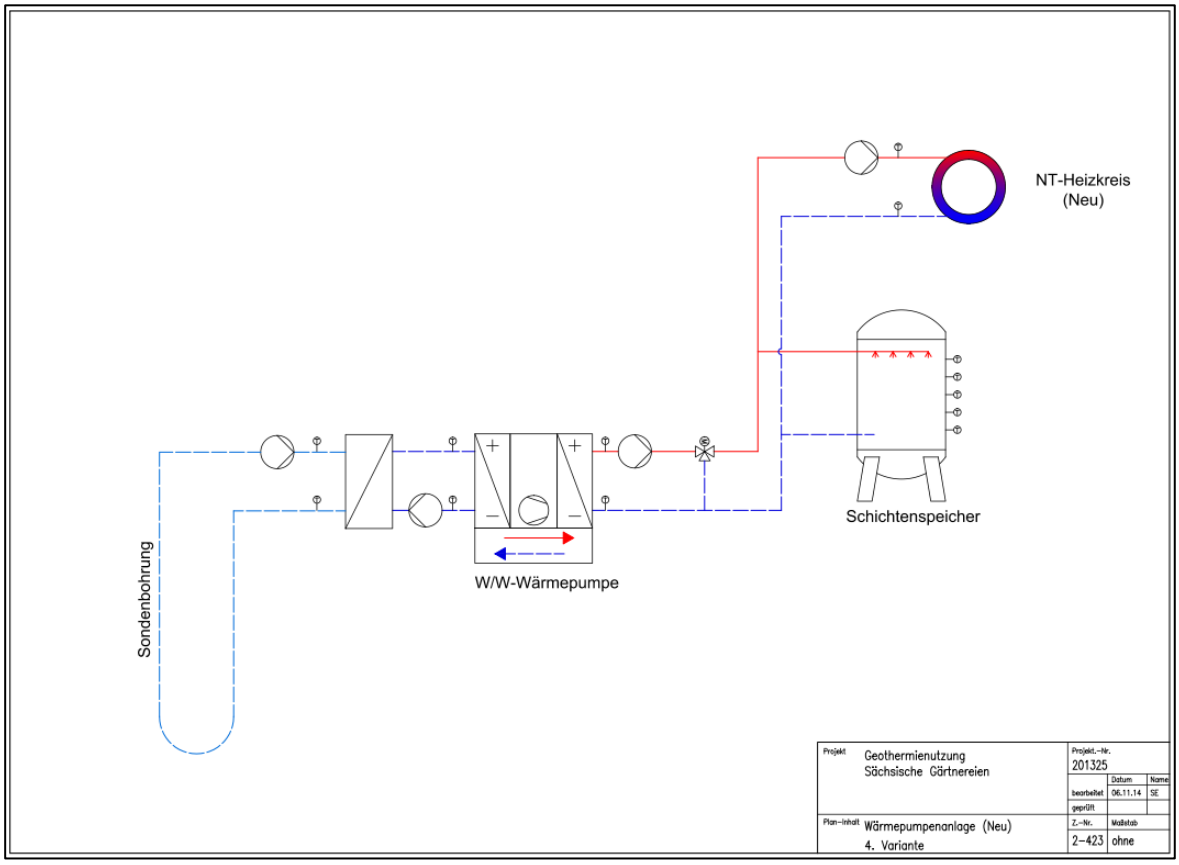



**Abbildung 83: Heizungsschema für die Integrierung einer Wärmepumpe in das Heizungssystem – Modellbetrieb D (monovalenter Betrieb)**

Auch wenn für den Modellbetrieb D eine rein geothermische Beheizung gefordert wurde, sind vor dem Hintergrund der Vergleichbarkeit verschiedener Wärmeversorgungssysteme neben dem Wärmepumpenbetrieb auch konventionelle Versorgungsmöglichkeiten betrachtet worden (dies ist auch im Hinblick auf eine vergleichende Wirtschaftlichkeitsbetrachtung nötig). Die Tabelle 51 gibt einen Überblick über die dabei betrachteten Versorgungskonzepte. In der Tabelle 52 sind die Ergebnisse der für das jeweilige System erfolgten Kesseldimensionierung enthalten.

**Tabelle 51: Untersuchte Wärmeversorgungskonzepte für den Modellbetrieb D**

| Variante | Leistungsaufteilung | | Wärmebedarfsdeckung | |
|---|---|---|---|---|
| | Grundlast (%) | Spitzenlast (%) | Grundlast (%) | Spitzenlast (%) |
| **Heizöl** | 100 | 0 | 100 | 0 |
| **Erdgas** | 100 | 0 | 100 | 0 |
| **Steinkohle** | 100 | 0 | 100 | 0 |
| **Pellets** | 100 | 0 | 100 | 0 |
| **Elektro-Wärmepumpe** | 100 | 0 | 100 | 0 |

**Tabelle 52: Kesseldimensionierung für den Modellbetrieb D**

| Variante | Leistungsaufteilung | |
|---|---|---|
| | Grundlast (kW) | Spitzenlast (kW) |
| **Heizöl** | 140 | |
| **Erdgas** | 140 | |
| **Steinkohle** | 140 | |
| **Pellets** | 140 | |
| **Elektro-Wärmepumpe** | 60 + 60 | |

Die **$CO_2$-Bilanz** für die betrachteten Wärmeversorgungskonzepte ist in der nachfolgenden Tabelle sowie in Abbildung 84 zusammengefasst. Wie zu erkennen ist, liegt der $CO_2$-Ausstoß für den monovalenten Wärmepumpenbetrieb unter Nutzung von Ökostrom nur bei ca. 320 kg/a bei „konventionellem“ Strombezug (deutscher Strommix) bei reichlich 5 t/a. Wie auch bei allen anderen Betrieben sind die Pelletkesselanlagen hinsichtlich der $CO_2$-Bilanz ebenfalls sehr günstig zu bewerten. Unter Nutzung fossiler Energieträger ist der $CO_2$-Ausstoß erwartungsgemäß mit Abstand am höchsten. Die schlechtesten Werte erreicht hier erneut die Steinkohle.

**Tabelle 53: Wärmebedarf und $CO_2$-Emissionen – Modellbetrieb D**

| Energieträger | $CO_2$-Äquivalent inkl. Vorketten nach GEMIS 4.8, in kg pro kWh |
|---|---|
| Heizöl | 0,302 |
| Erdgas | 0,224 |
| Steinkohle | 0,438 |
| Pellets | 0,041 |
| Deutscher Strommix | 0,633 |
| Ökostrom | 0,04 |

| Energievarianten | Energieverbrauch | Stromverbrauch, in kWh | $CO_2$-Ausstoß, in t pro a (Ökostromnutzung) | $CO_2$-Ausstoß, in t pro a (Nutzung Deutscher Strommix) |
|---|---|---|---|---|
| Heizöl | 2.355 l/a | 450 | 7,2 | 7,4 |
| Erdgas | 2.493 m³/a | 450 | 5,8 | 6,1 |
| Steinkohle | 2.941 kg/a | 993 | 11,4 | 12 |
| Pellets | 5.264 kg/a | 1.003 | 1,1 | 1,7 |
| 2 x 60 kW Elektro-Wärmepumpe (JAZ 3,8) | -- | 8.068 | 0,32 | 5,1 |

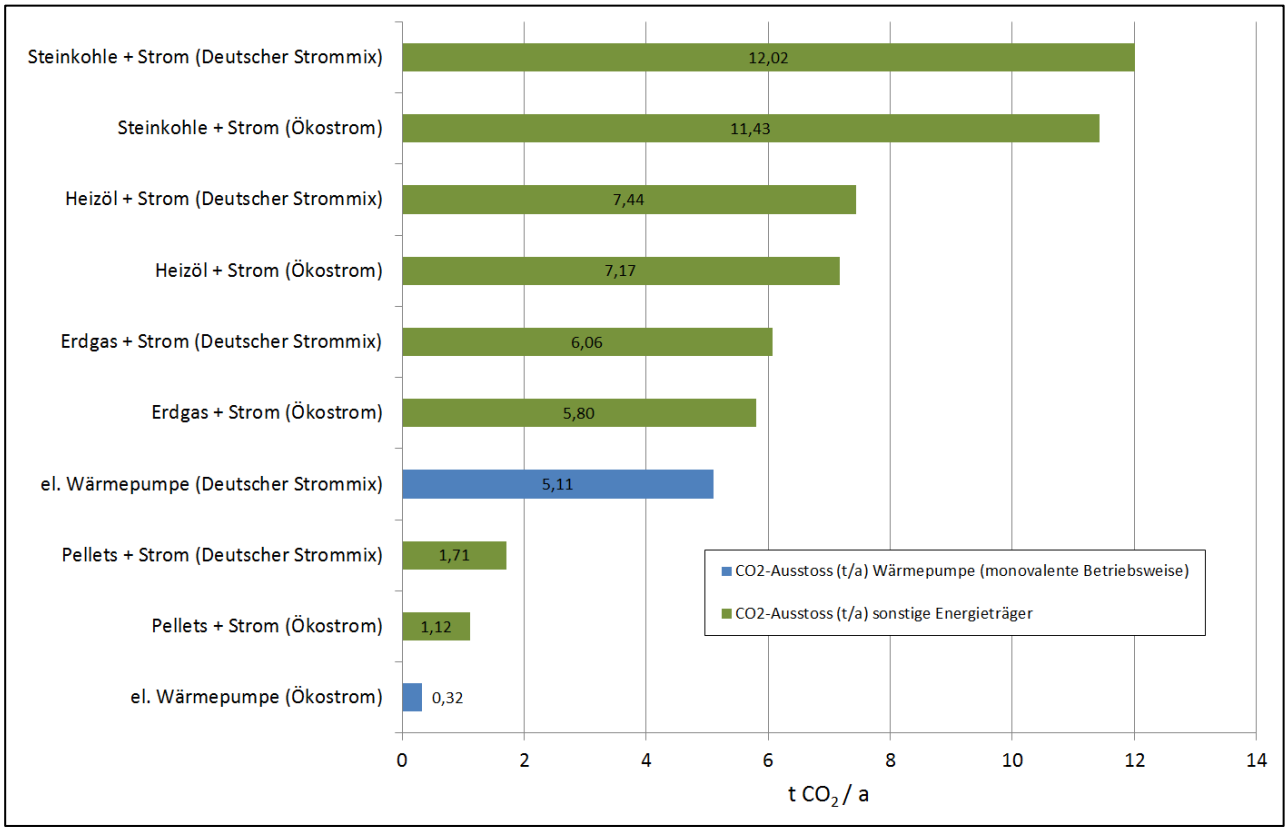



**Abbildung 84: $CO_2$-Ausstoß (t/a) unterschiedlicher Energievarianten – Modellbetrieb D**

# 8.2 Auslegung der geothermischen Systeme

## 8.2.1 Modellregion X (Raum Dresden)

### 8.2.1.1 Überblick der untersuchten Wärmequellensysteme

Für den Modellbetrieb D wird **für jeden Standort** nur eine Leistungsvariante untersucht, weil es keine Grund-/Spitzenlastaufteilung gibt (kein bivalentes System). Die gesamte Heizlast wird nur über ein System (Geothermie) abgedeckt.

In der Region X sind für den Modellbetrieb D nur zwei geothermischen Entzugsverfahren untersucht worden:

- Oberflächennahe Erdwärmesonden
- Mitteltiefe Erdwärmesonden

Die Brunnenanlagen scheiden aus der Betrachtung aus, weil bereits vorab erkennbar ist, dass die in jedem Fall anfallenden Kosten der Wasseraufbereitung zu Investitionskosten führen werden, die deutlich höher sind als bei den Erdwärmesondensystemen. Aufgrund der geringen Jahresheizarbeit werden die geschlossenen Systeme (Erdwärmesonden) einen deutlich kleineren Umfang haben als bei den bisher betrachteten Betrieben.

Es erfolgten somit zwei numerische 3D-Modellierungen der erforderlichen Wärmequellenanlagen.

#### 8.2.1.2 Ergebnisse Modellbetrieb D, Region X

**Oberflächennahe Erdwärmesonden**

Die generellen Randbedingungen für die Dimensionierungsrechnungen zur Auslegung der oberflächennahen Erdwärmsonden sind bereits in Kapitel 4.1 dargestellt. Für den Modellbetrieb D ist jedoch in jedem Fall eine konkrete, standortabhängige Detailplanung notwendig, weil insbesondere die Hydraulik und Regelung der Wärmepumpe bzw. der gesamten Wärmequellenanlage überaus anspruchsvoll ist (siehe dazu auch Kapitel 8.3.2).

Im Ergebnis mehrerer Iterationsrechnungen erwies sich eine oberflächennahe Erdwärmesondenanlage, bestehend aus **drei Erdwärmesonden zu je 90 m Endteufe (270 Bohrmeter),** als ausreichend zur Abdeckung der geforderten Lasten. Die räumliche Anordnung der Sonden im Betriebsgelände enthält die Abbildung 100.

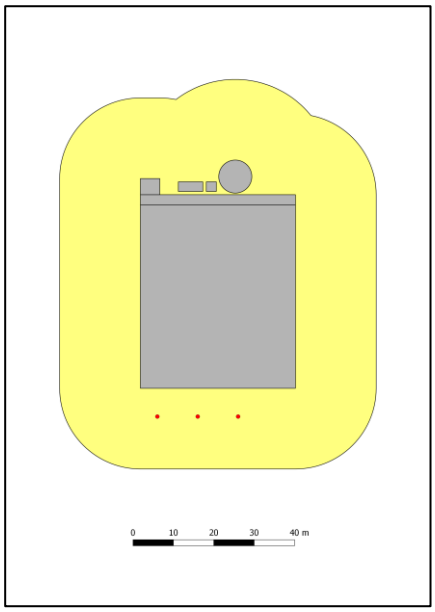



**Abbildung 85: Modellbetrieb D, Standort X – Anordnung der oberflächennahen Erdwärmesonden**

Nach einer Simulationszeit von 25 Jahren werden mittlere Fluidtemperaturen von 0,4 °C berechnet. Die räumliche Ausbreitung der Temperaturfront ist in der Abbildung 86 dargestellt, der zeitliche Verlauf der Fluidtemperaturen in der Abbildung 87. Die räumliche Ausbreitung der Temperaturfront ist für den Bereich des GWL dargestellt. Aus den Darstellungen wird deutlich, dass die Erdwärmesondenanlage nachhaltig funktionssicher ausgelegt ist. Aufgrund des (im Vergleich mit den übrigen Betrieben) geringen Lasteintrags sind die räumlichen Auswirkungen der Temperaturänderungen im Untergrund nur gering. Die kurzzeitig hohen Spitzenlasten spiegeln sich praktisch nicht wider.

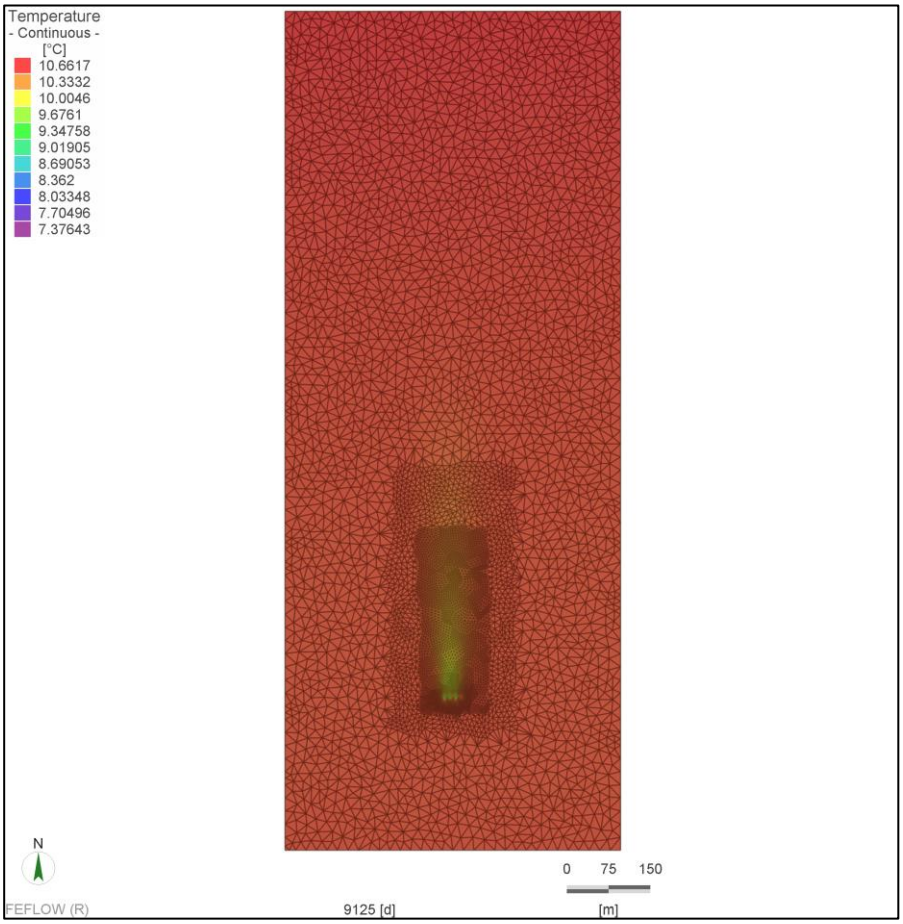



**Abbildung 86: Modellbetrieb D, Standort X, Temperaturverhältnisse im GWL nach 25 Jahren (oberflächennahe Erdwärmesonden)**

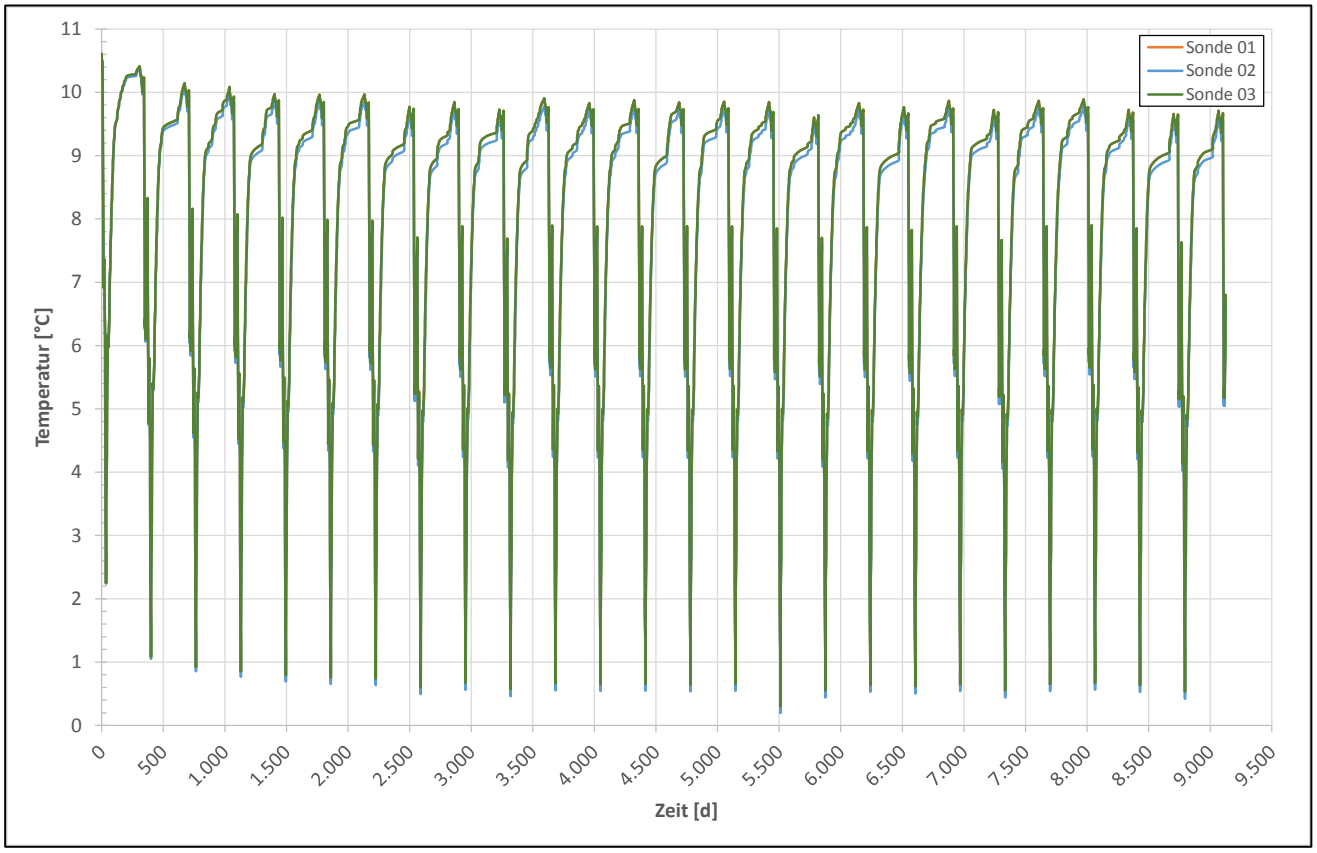



**Abbildung 87: Modellbetrieb D, Standort X – Entwicklung der Fluidtemperaturen in 25 Jahren (oberflächennahe Erdwärmesonden)**

Auf eine Ermittlung der langjährig mittleren Entzugsleistung wird bei Modellbetrieb D generell verzichtet, weil aus der sehr hohen Leistung der Wärmepumpe (bei gleichzeitig eher geringer Heizarbeit) eine sehr hohe Entzugsleistung resultiert. Die Angabe wäre somit selbst als „relativer Vergleichsmaßstab“ nicht mehr nutzbar.

### Mitteltiefe Erdwärmesonden

Im Ergebnis mehrerer Iterationsrechnungen erwies sich eine mitteltiefe Erdwärmesondenanlage, bestehend aus **einer Erdwärmesonde zu 310 m Endteufe** als ausreichend zur Abdeckung der geforderten Lasten. Die Sonde wurde direkt südlich des Gewächshauskomplexes geplant. Jedoch ist generell auch jeder andere Standort möglich.

Im Vergleich mit den oberflächennahen Erdwärmesonden werden somit sogar 40 Bohrmeter mehr angesetzt, jedoch werden nach 25 Betriebsjahren auch etwa 0,3 °C höhere Fluidtemperaturen prognostiziert (ca. 0,7 °C).

Die räumliche Ausbreitung der Temperaturfront ist in der Abbildung 88 dargestellt, der zeitliche Verlauf der Fluidtemperaturen ist in der Abbildung 89 zu sehen.

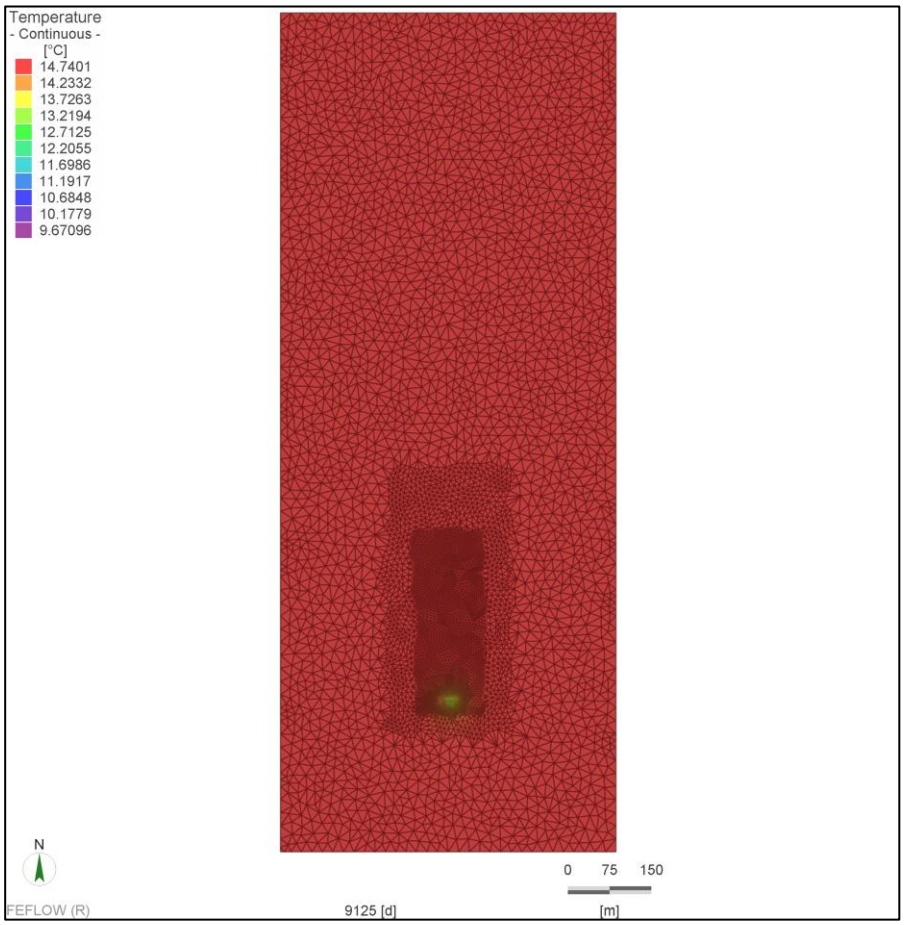



**Abbildung 88: Modellbetrieb D, Standort X – Temperaturverhältnisse im GWL nach 25 Jahren (mitteltiefe Erdwärmesonde)**

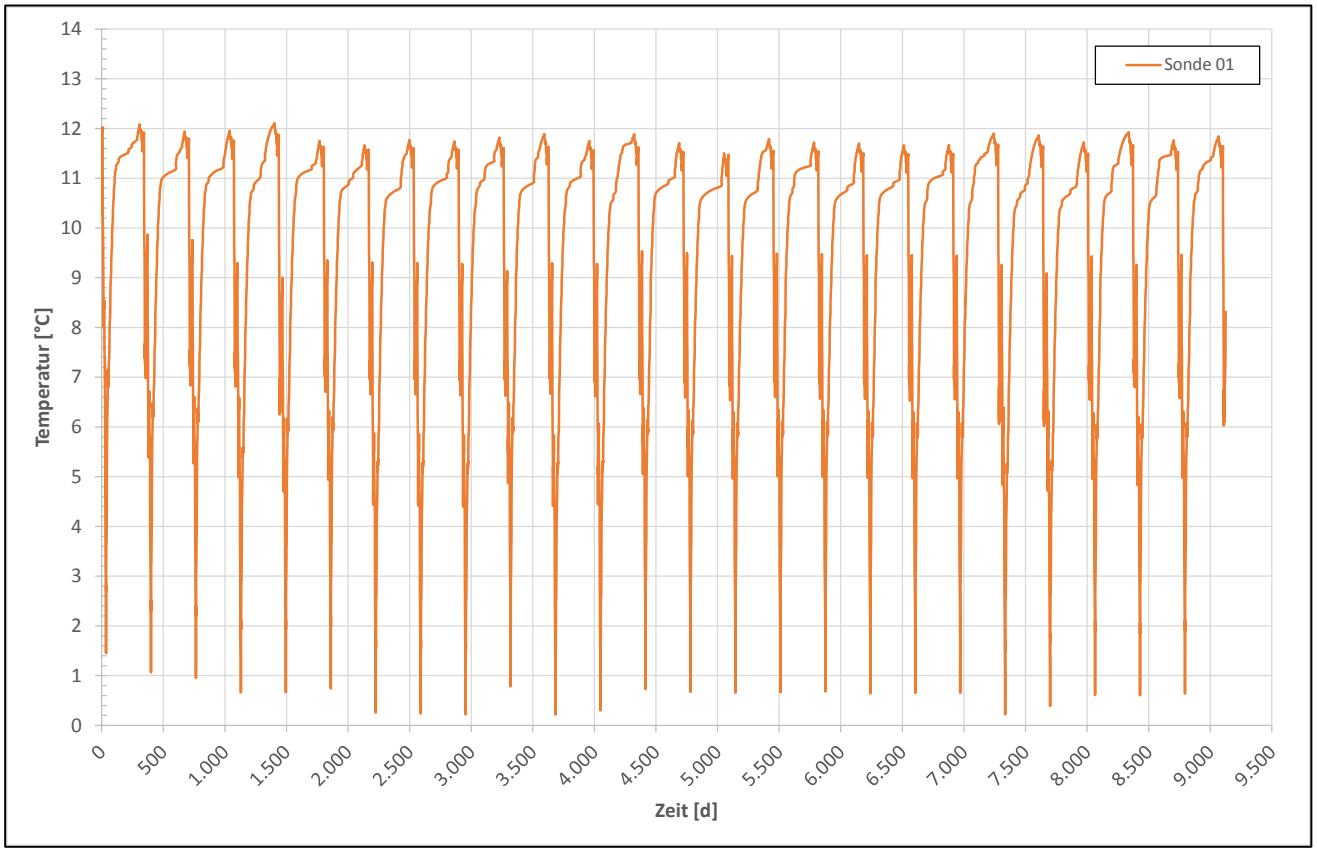



**Abbildung 89: Modellbetrieb D, Standort X – Entwicklung der Fluidtemperaturen in 25 Jahren (mitteltiefe Erdwärmesonde)**

### 8.2.2 Modellregion Y (Raum Leipzig)

#### 8.2.2.1 Überblick der untersuchten Wärmequellensysteme

In der Region Y sind für den Modellbetrieb D die identischen Berechnungen wie für die Region X erfolgt. Die Ausführungen in Kapitel 8.2.1.1 gelten somit analog.

Es erfolgten somit auch hier zwei numerische 3D-Modellierungen der erforderlichen Wärmequellenanlagen.

#### 8.2.2.2 Ergebnisse Modellbetrieb D, Region Y

**Oberflächennahe Erdwärmesonden**

Im Ergebnis der erfolgten Berechnungen sind zur Abdeckung der erforderlichen Lasten **3 Erdwärmesonden zu je 100 m Endteufe (300 Bohrmeter)** erforderlich. Die räumliche Anordnung der Sonden im Betriebsgelände enthält die Abbildung 90. Im Vergleich mit der Region X ist die Erdwärmesondenanlage somit fast identisch, es werden in Summe lediglich 30 Bohrmeter zusätzlich ausgewiesen.

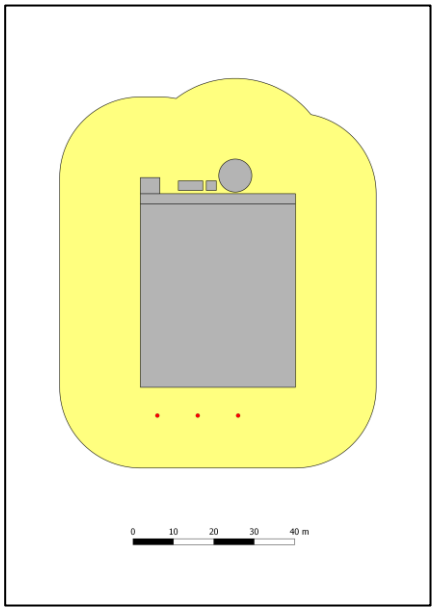



**Abbildung 90: Modellbetrieb D, Standort Y – Anordnung der oberflächennahen Erdwärmesonden**

Nach einer Simulationszeit von 25 Jahren werden mittlere Fluidtemperaturen von 0,9 °C berechnet. Die räumliche Ausbreitung der Temperaturfront und der zeitliche Verlauf der Fluidtemperaturen sind in Abbildung 91 bzw. Abbildung 92 zu sehen. Aus den Darstellungen wird deutlich, dass die Erdwärmesondenanlage nachhaltig funktionssicher ausgelegt ist.

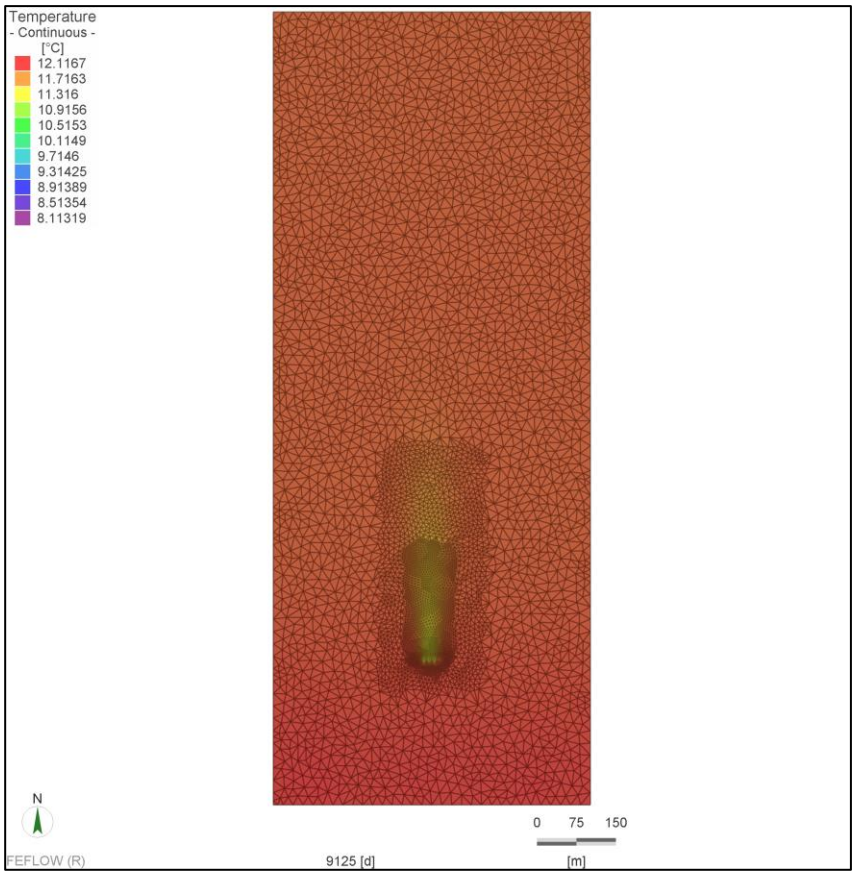



**Abbildung 91: Modellbetrieb D, Standort Y – Temperaturverhältnisse im Grundwasserleiter (oberflächennahe Erdwärmesonden)**

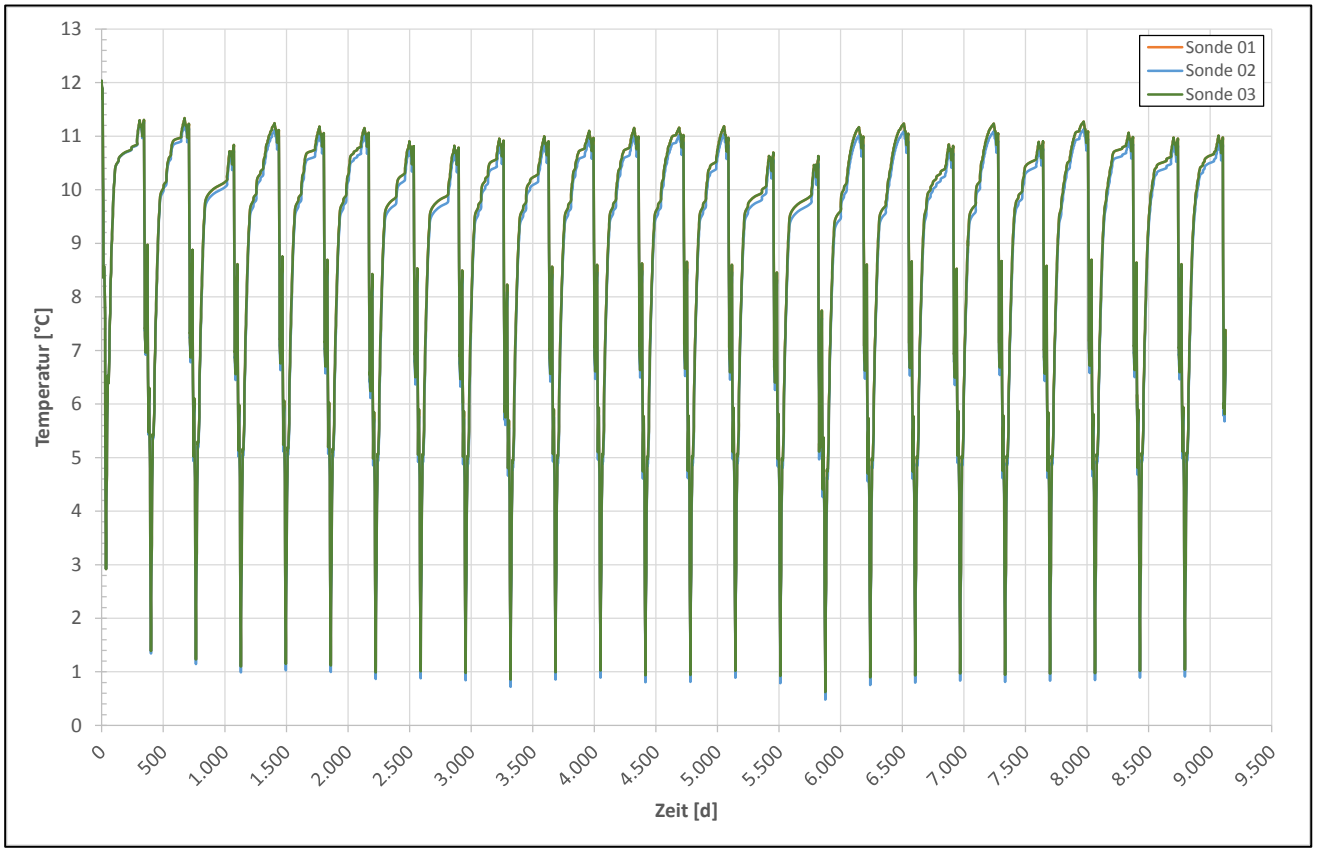



**Abbildung 92: Modellbetrieb D, Standort Y – Entwicklung der Fluidtemperaturen in 25 Jahren (oberflächennahe Erdwärmesonden)**

### Mitteltiefe Erdwärmesonden

Im Ergebnis mehrerer Iterationsrechnungen erwies sich eine mitteltiefe Erdwärmesondenanlage, bestehend aus **einer Erdwärmesonde zu 310 m Endteufe,** als ausreichend zur Abdeckung der geforderten Lasten. Somit ist die Sondenanlage identisch zur Modellregion X zu dimensionieren. Auch die räumliche Anordnung der Erdwärmesonde wurde identisch zur Modellregion X gewählt.

Im Vergleich mit den oberflächennahen Erdwärmesonden werden somit sogar 10 Bohrmeter mehr angesetzt. Dies wird dadurch begründet, dass selbst die oberflächennahen Erdwärmesondenanlagen mit jeweils nur drei Erdwärmesonden sehr klein ausfallen und die gegenseitige Beeinflussung nur gering ist. Der konvektive Wärmetransport durch die Grundwasserströmung wirkt sich bei den oberflächennahen Erdwärmesonden vergleichsweise günstiger aus als die höhere, mittlere Untergrundtemperatur bei den mitteltiefen Erdwärmesonden. Folglich fallen die oberflächennahen Erdwärmesondensysteme im direkten Vergleich etwas günstiger (im Sinne geringerer Gesamtbohrmeter) aus.

Nach einer Simulationszeit von 25 Jahren werden mittlere Fluidtemperaturen von 0,6 °C berechnet. Die Anlage ist somit auch hier nachhaltig funktionssicher ausgelegt. Die räumliche Ausbreitung der Temperaturfront und der zeitliche Verlauf der Fluidtemperaturen sind in der Abbildung 93 bzw. Abbildung 94 zu sehen.

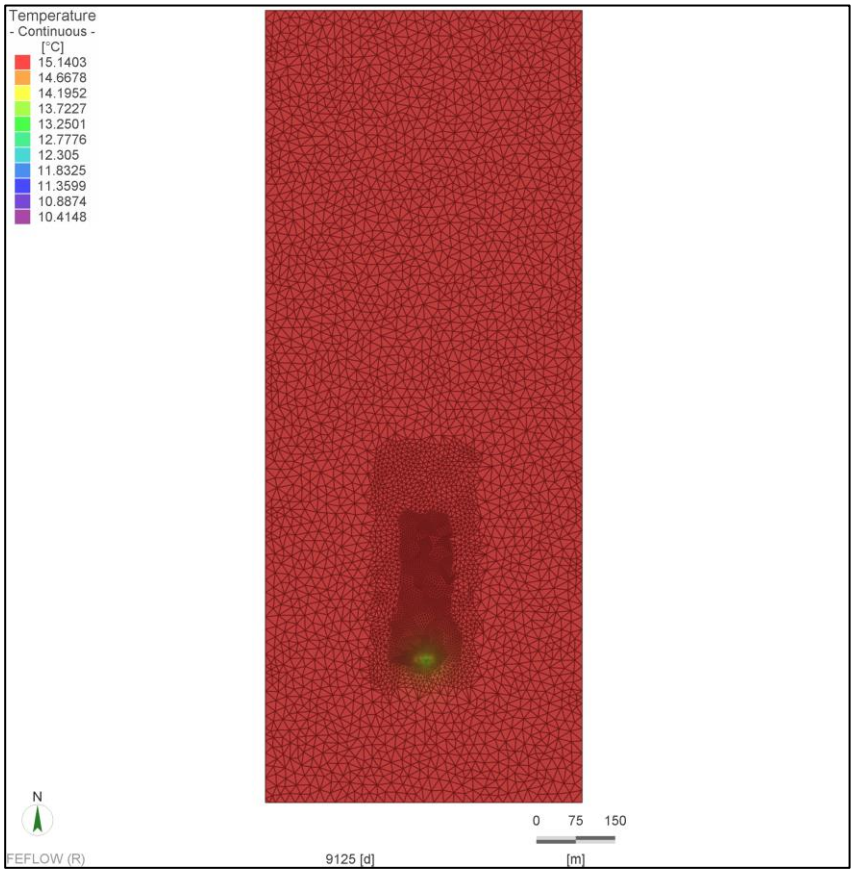



**Abbildung 93: Modellbetrieb D, Standort Y – Temperaturverhältnisse im GWL nach 25 Jahren (mitteltiefe Erdwärmesonden)**

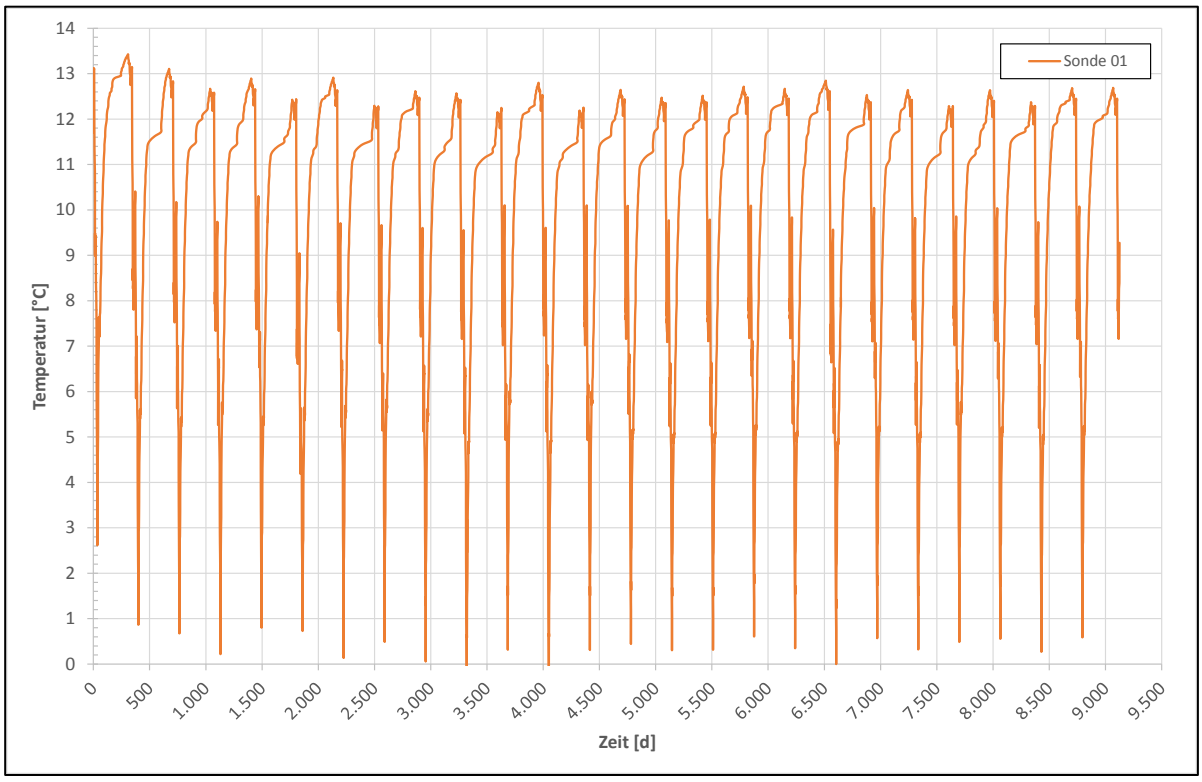



**Abbildung 94: Modellbetrieb D, Standort Y – Entwicklung der Fluidtemperaturen in 25 Jahren (mitteltiefe Erdwärmesonden)**

### 8.2.3 Modellregion Z (Raum Chemnitz)

#### 8.2.3.1 Überblick der untersuchten Wärmequellensysteme

In der Region Z sind für den Modellbetrieb D die identischen Berechnungen wie für die Region X und Y erfolgt. Die Ausführungen in Kapitel 8.2.1.1 gelten somit analog.

Es erfolgten somit auch hier zwei numerische 3D-Modellierungen der erforderlichen Wärmequellenanlagen.

#### 8.2.3.2 Ergebnisse Modellbetrieb D, Region Z

**Oberflächennahe Erdwärmesonden**

Im Ergebnis der erfolgten Berechnungen sind zur Abdeckung der erforderlichen Lasten **3 Erdwärmesonden zu je 130 m Endteufe (390 Bohrmeter)** erforderlich. Die räumliche Anordnung der Sonden im Betriebsgelände enthält die Abbildung 95. Im Vergleich mit der Region X bzw. Y sind die Erdwärmesonden somit praktisch identisch angeordnet. Wie bei allen anderen Modellbetrieben auch, werden in der Modellregion Z jedoch mehr Bohrmeter zur Abdeckung der benötigten Lasten berechnet (aufgrund der geringeren Untergrundtemperatur, geringeren geothermischen Tiefenstufe und der fehlenden Grundwasserleiter).

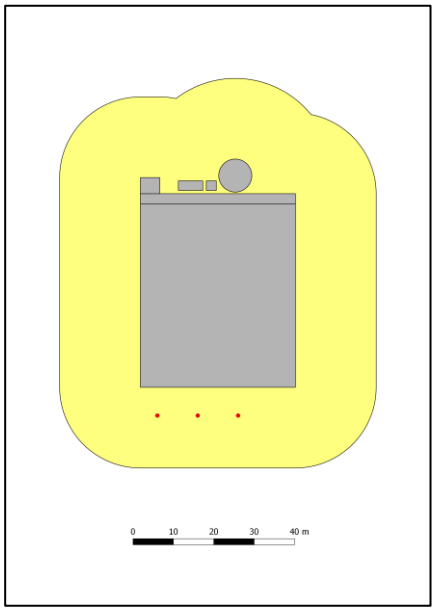



**Abbildung 95: Modellbetrieb D, Standort Z – Anordnung der oberflächennahen Erdwärmesonden**

Nach einer Simulationszeit von 25 Jahren werden mittlere Fluidtemperaturen von 0,4 °C berechnet. Die räumliche Ausbreitung der Temperaturfront und der zeitliche Verlauf der Fluidtemperaturen sind in Abbildung 96 bzw. Abbildung 97 zu sehen. Aus den Darstellungen wird deutlich, dass die Erdwärmesondenanlage nachhaltig funktionssicher ausgelegt ist.

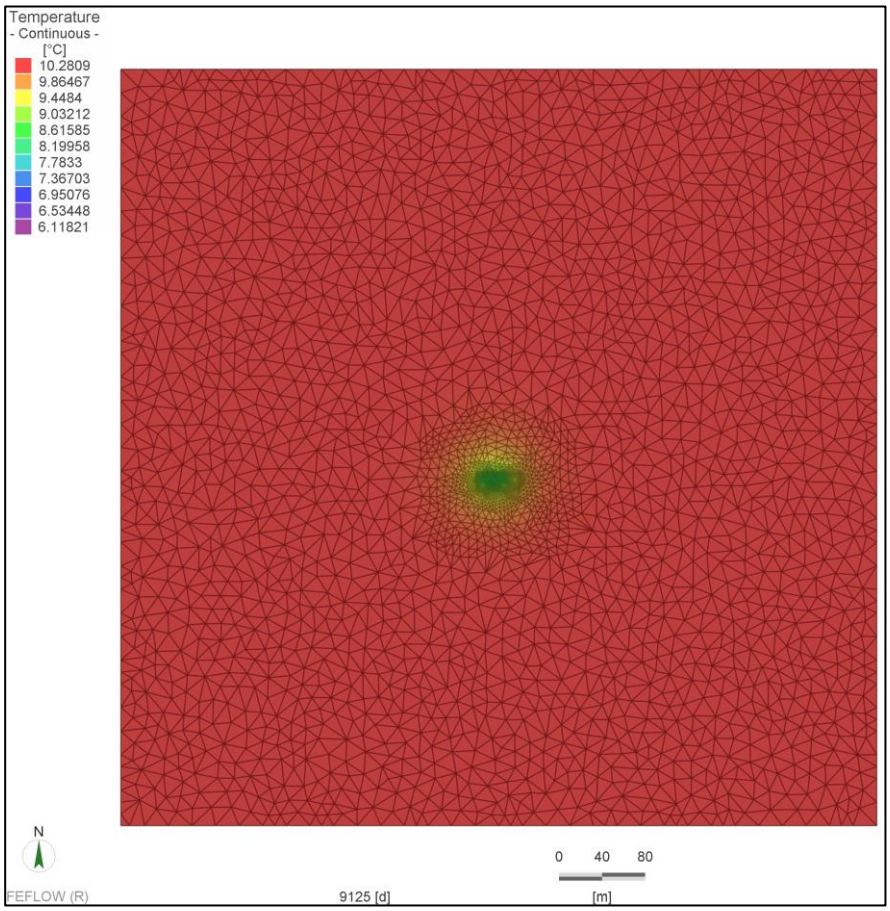



**Abbildung 96: Modellbetrieb D, Standort Z – Temperaturverhältnisse im Untergrund (oberflächennahe Erdwärmesonden)**

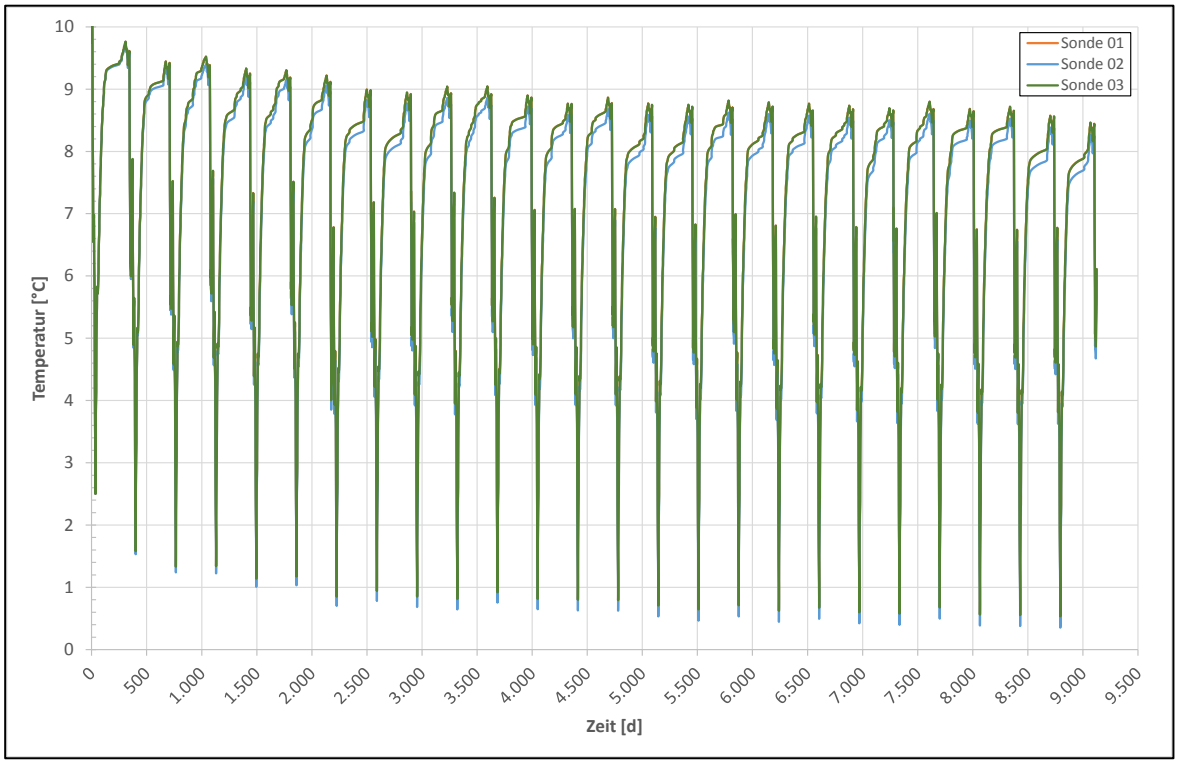



**Abbildung 97: Modellbetrieb D, Standort Z – Entwicklung der Fluidtemperaturen in 25 Jahren (oberflächennahe Erdwärmesonden)**

### Mitteltiefe Erdwärmesonden

Im Ergebnis mehrerer Iterationsrechnungen erwies sich eine mitteltiefe Erdwärmesondenanlage, bestehend aus **einer Erdwärmesonde zu 395 m Endteufe**, als ausreichend zur Abdeckung der geforderten Lasten. Die räumliche Anordnung der Erdwärmesonde wurde identisch zur Modellregion X/Y gewählt. Im Vergleich mit den oberflächennahen Erdwärmesonden werden somit fast die identischen Bohrmeter benötigt.

Nach einer Simulationszeit von 25 Jahren werden mittlere Fluidtemperaturen von knapp 0,6 °C berechnet. Die Anlage ist somit auch hier großzügig ausgelegt. Die räumliche Ausbreitung der Temperaturfront und der zeitliche Verlauf der Fluidtemperaturen sind in Abbildung 98 bzw. Abbildung 99 zu sehen.

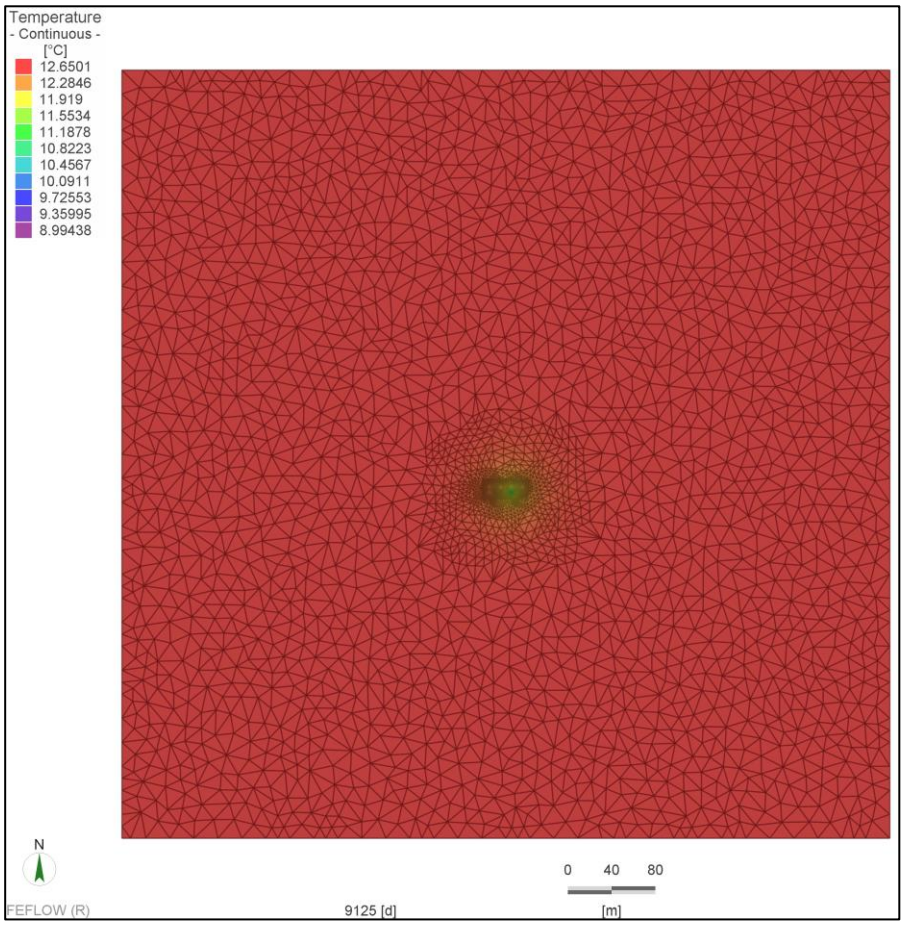



**Abbildung 98: Modellbetrieb D, Standort Y – Temperaturverhältnisse im Untergrund nach 25 Jahren (mitteltiefe Erdwärmesonden)**

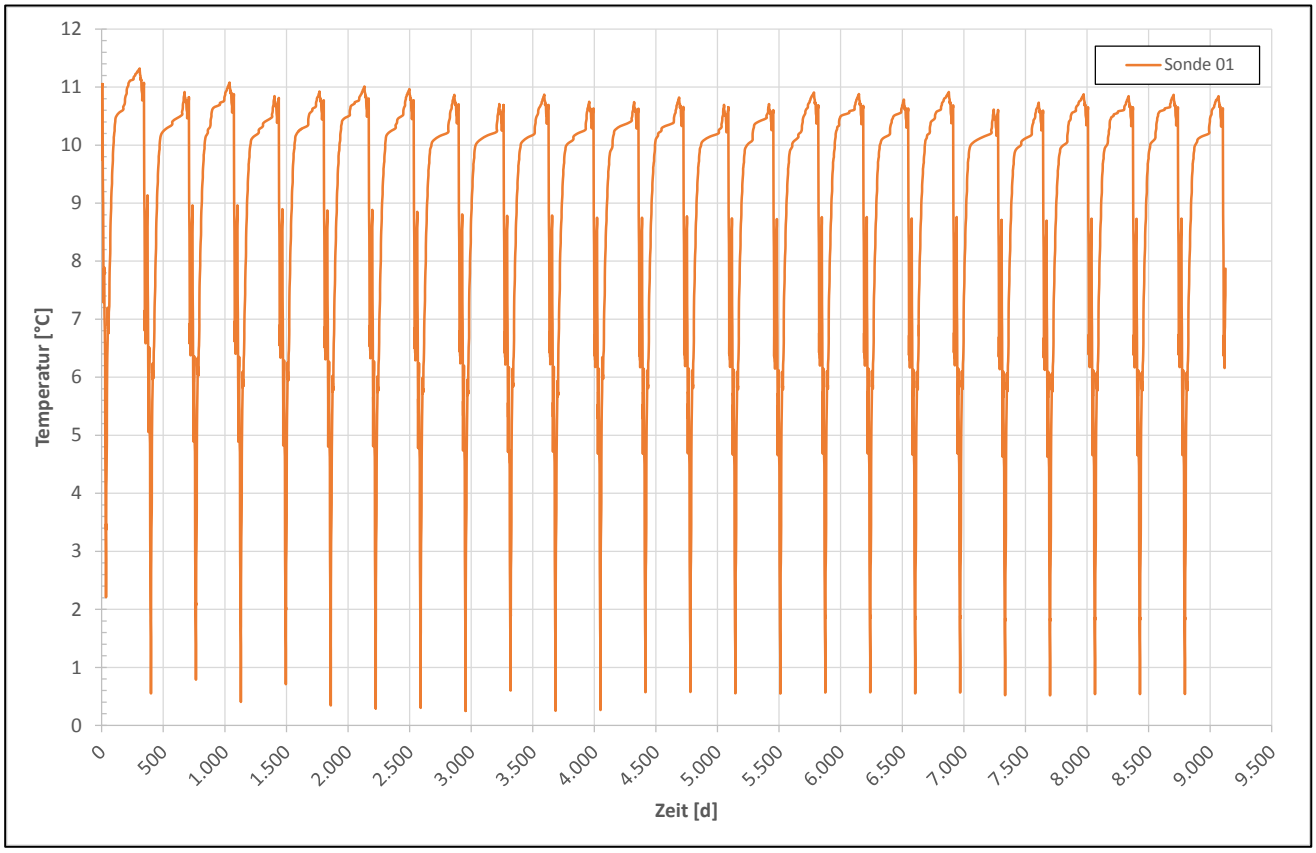



**Abbildung 99: Modellbetrieb D, Standort Z – Entwicklung der Fluidtemperaturen in 25 Jahren (mitteltiefe Erdwärmesonden)**

# 8.3 Investitionskosten und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

### 8.3.1 Entwicklung der Energiekosten

Eine wichtige Randbedingung für objektive Betrachtungen zur wirtschaftlichen Realisierbarkeit einzelner Nutzungskonzepte stellt die Preisentwicklung einzelner Energieträger dar. In der Tabelle 17 ist die Entwicklung der Energiekosten für die letzten 10 Jahre zusammengestellt. Zudem sind dort prognostische Entwicklungsoptionen einer Verteuerung/Verbilligung um je 30 % mit dargestellt.

### 8.3.2 Investitionskosten

Weil es sich beim Modellbetrieb D um einen Neubau handelt, sind nicht allein die Kosten für die Herstellung des Heizungssystems relevant. Folglich wurden im Ergebnis der Objektplanung auch die Kosten für die bauliche Realisierung des gesamten Gewächshauskomplexes mit berücksichtigt. Erschließungskosten sind aufgrund der extrem verschiedenen Standortbedingungen nicht mit enthalten.

In der folgenden Tabelle sind die Ergebnisse der Kostenschätzung der Bauwerkskonstruktion zusammengefasst. Dabei erfolgte eine Untergliederung in zusammenhängende Baugruppen und die Zuordnung zu den entsprechenden Kostengruppen.

**Tabelle 54: Kostenschätzung Gewächshausanlage – Modellbetrieb D**

| Kostengruppe | Baugruppe | Schätzkosten |
|---|---|---|
| 300 | Bauwerkskonstruktion | |
| 320 | Gründung | |
| | Erdarbeiten Grundleitungen (RW) | 3.600,00 € |
| | Bodenaushub für Ringerder | 6.000,00 € |
| | Unterbau Bodenplatte | 1.500,00 € |
| | Bodenplatten (inkl. Hartkorneinstreu) | 10.500,00 € |
| 330-370 | Gewächshauskonstruktion und Gewächshaushülle (inkl. Montagehilfsprofile, Lüftungsklappen, Tore, Türen, Sockel und Fundamente) | 139.680,00 € |
| | **Summe Kostengruppe 300:** | **161.280 €** |
| 400 | Bauwerk – technische Anlagen | |
| 410 | Regenwasserspeichertank (244 m³) + Pumpensumpf + Revisions-schacht | 6.612,00 € |
| | Tagesvorratsbehälter (23 m³) Höhe 3,88 m; Durchmesser 2,73 m | 2.760,00 € |
| | Düsenrohrbewässerung ohne Rücklauf | 22.579,00 € |
| | Grundleitungen (RW) | 2.400,00 € |
| | RW-Sickerschacht (ausgelegt für ein Starkregen) | 15.052,00 € |
| 420 | Raumheizflächen | |
| | Alu-Flügelrohrheizung (3 Flügelrohre + beidseitige Ketten zum Umlegen) | 150.000,00 € |
| | 20'-Seecontainer (inkl. Lieferung) | 4.200,00 € |
| | Pufferspeicher (30 m³) und Zubehör | 25.000,00 € |
| | Zuleitungen, Pumpen, Mischergruppen im Gewächshaus | 12.000,00 € |
| 440 | Starkstromanlagen | 28.224,00 € |
| 470 | Nutzungsspezifische Anlagen | |
| | 1-fach Energieschirm (Tagesschirm und Schattierung) | 24.460,00 € |
| | Umluftventilatoren | 5.400,00 € |
| 480 | Gebäudeautomation | 18.816,00 € |
| | **Summe Kostengruppe 400** | **312.503,00 €** |
| | **Summe Kosten300 und 400** | **473.783,00 €** |
| 700 | Baunebenkosten (Genehmigungen, Planungskosten, u.a.) 15% | 71.067,00 € |
| | **Summe netto Investkosten** | 544.850,00 € |
| | **Mehrwertsteuer** | 103.521,00 € |
| | **Summe brutto Investkosten** | 648.372,00 € |

Die Kostenschätzung für die Wärmeerzeugungsanlage inkl. Abgasanlagen und hydraulischer Einbindung (Kostengruppe 420) ist in der Tabelle 55 dargestellt. Unter Beachtung der verschiedenen geothermischen Nutzungsoptionen erfolgt in der Tabelle 56 eine separate Aufführung der Schätzkosten für die geothermische Wärmeerzeugung (Wärmequelle einschl. Wärmepumpe). Die geothermischen Wärmequellensysteme sind

darüber hinaus im Anlagenband (5.4.1) noch einmal detailliert hinsichtlich ihrer technischen Spezifikation und der jeweiligen Kostenanteile zusammengestellt.

Die Zusammenfassung der Gesamtkosten zeigt Tabelle 57 und Tabelle 58. Dargestellt sind jeweils die Kosten für die geothermische Erschließung mit oberflächennahen bzw. mitteltiefen Erdwärmesonden und die kalkulierten Aufwendungen für den gesamten Neubau. Wie zu erkennen ist, stellen auch hier die oberflächennahen Erdwärmesonden das kostengünstigste geothermische System dar. Die Investitionskosten von mindestens reichlich 65.000 € (Region X) sind jedoch vor dem Hintergrund der geringen Jahresheizarbeit immer noch sehr hoch. Grund dafür sind nicht die reinen Kosten für die geothermische Erschließung, sondern die Kosten für die Wärmepumpen (2 x 60 kW) und die Kosten für deren Einbau, Regelung sowie separate, deutlich leistungsstärkere Soleumwälzpumpen. Hierfür werden allein ca. 46.000 € geschätzt (siehe Anlagenband 5.4.1).

Grundsätzlich ist die Anlagenhydraulik (insbesondere der Wärmequelle) bei Modellbetrieb D sehr anspruchsvoll und muss im Einzelfall jeweils konkret geplant werden. Einer vergleichsweise kleinen Wärmequelle (nur wenige Erdwärmesonden) steht eine „überproportional“ große Wärmepumpe mit einem Soledurchsatz um ca. 20 bis 26 m³/h gegenüber. Bei Einsatz von zwei modulierenden Wärmepumpen (je zwei Wärmepumpen mit zwei Leistungsstufen – 30 kW + 30 kW) fällt dieser sehr hohe Soledurchsatz nur sehr kurzzeitig beim Betrieb beider Wärmepumpen im Volllastbetrieb an. Überwiegend wird nur eine Wärmepumpe, oft auch nur mit einem Verdichter arbeiten. Dann sind die nötigen Durchsätze deutlich geringer. Sobald jedoch ein zweiter Verdichter bzw. die zweite Wärmepumpe zugeschaltet werden muss, werden die Druckverluste im Solekreis massiv ansteigen. Je nach konkret erforderlichem Soledurchsatz im Maximalfall (hier unterscheiden sich die Angaben der Hersteller) muss das Sondensystem im Einzelfall angepasst werden. Hier können z. B. Sonderlösungen von 3-fach-U-Sonden in DA 40 mm (bei den oberflächennahen Systemen) angedacht werden. Diese sind mit den üblichen technischen Mitteln ohne weiteres herstellbar. Grundsätzlich ist das geothermische System so ausgelegt, die nötige Spitzenleistung (entsprechend den angesetzten Referenzverhältnissen) nur sehr kurzzeitig zur Verfügung zu stellen. Bei extremeren, länger anhaltenden Kälteperioden wird das System nicht mehr in der Lage sein, die nötige Heizleistung zur Verfügung zu stellen. Der Einbau leistungsfähiger Heizpatronen in den Pufferspeicher zur Unterstützung des Wärmepumpenbetriebs in Extremsituationen ist daher in jedem Fall empfehlenswert. Dies ist technisch einfach und darüber hinaus sehr kostengünstig realisierbar. In der Kostenaufstellung für die Wärmepumpentechnik (Anlagenband 5.4.1) sind dafür bereits entsprechende Kosten mit eingerechnet worden.

**Tabelle 55: Kostenschätzung Wärmeerzeugungsanlage inkl. Abgasanlagen und hydraulische Einbindung (Kostengruppe 420) Modellbetrieb D**

| Variante Wärmeerzeugung | Leistungsaufteilung | | Pufferspeicher (m³) | Kosten (€, netto) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | WP (kW) | Kesselanlage (kW) | | WP | Kesselanlage | Pufferspeicher |
| **Monovalent Heizöl** | -- | 140 | -- | -- | 42.000 | -- |
| **Monovalent Erdgas** | -- | 140 | -- | -- | 30.000 | -- |
| **Monovalent Steinkohle** | -- | 140 | 30 | -- | 63.380 | 25.000 |
| **Monovalent Pellets** | -- | 140 | 30 | -- | 74.630 | 25.000 |
| **Elektrowärmepumpe** | 60 + 60 | -- | 30 | 1) | -- | 25.000 |

[1)] Detailaufgliederung gemäß nachfolgender Tabelle

**Tabelle 56: Kostenschätzung Wärmepumpenanlage inkl. geothermischer Erschließung für die Standorte Dresden, Leipzig und Chemnitz bei unterschiedlichen Nutzungsvarianten Modellbetrieb D**

| Geothermische Nutzungsvariante | Kosten Wärmepumpe inkl. geothermische Erschließung (€, netto) | | |
|---|---|---|---|
| | Standorte | | |
| | Raum Dresden/Meißen | Raum Leipzig | Raum Chemnitz |
| | Leistung Wärmepumpe | | |
| | 120 kW | 120 kW | 120 kW |
| **Oberflächennahe Erdwärmesonden** | 65.419 | 66.712 | 70.591 |
| **Mitteltiefe Erdwärmesonden** | 113.844 | 109.424 | 133.019 |
| **Brunnenanlagen** | Nicht wirtschaftlich nutzbar | | |

**Tabelle 57: Investitionskosten Gewächshausneubau und geothermische Erschließung (gesamt) – oberflächennahe Erdwärmesonden – Modellbetrieb D**

| Investitionskosten (€, netto) | Oberflächennahe Erdwärmesonden | | |
|---|---|---|---|
| | Standorte | | |
| | Raum Dresden/Meißen | Raum Leipzig | Raum Chemnitz |
| **Gewächshausneubau** | | 544.850 | |
| **Geothermische Erschließung** | 65.419 | 66.712 | 70.591 |
| **Investitionskosten netto, gesamt (€)** | 610.269 | 611.562 | 615.441 |

**Tabelle 58: Investitionskosten Gewächshausneubau und geothermische Erschließung (gesamt) – mitteltiefe Erdwärmesonden – Modellbetrieb D**

| Investitionskosten (€, netto) | Mitteltiefe Erdwärmesonden | | |
|---|---|---|---|
| | Standorte | | |
| | Raum Dresden/Meißen | Raum Leipzig | Raum Chemnitz |
| **Gewächshausneubau** | | 544.850 | |
| **Geothermische Erschließung** | 113.844 | 109.424 | 133.019 |
| **Investitionskosten netto, gesamt (€)** | 658.694 | 654.274 | 677.869 |

Im Ergebnis der Betrachtungen wird deutlich, dass die oberflächennahen Erdwärmesondenanlagen jeweils die kostengünstigste Variante darstellen. Dennoch fallen für die Herstellung der Wärmequellenanlage einschl. Wärmepumpe Kosten im Bereich um ca. 65.000 bis 70.000 € (je nach Modellregion) an. Bei der Nutzung mitteltiefer Erdwärmesonden liegen die Kosten jeweils deutlich über 100.000 €.

Unter Beachtung der Kosten für den Gewächshausneubau von ca. 545.000 € liegen die gesamten Investitionskosten (wiederum je nach Standort) zwischen etwa 610.000 € und 615.000 € (siehe Abbildung 100).

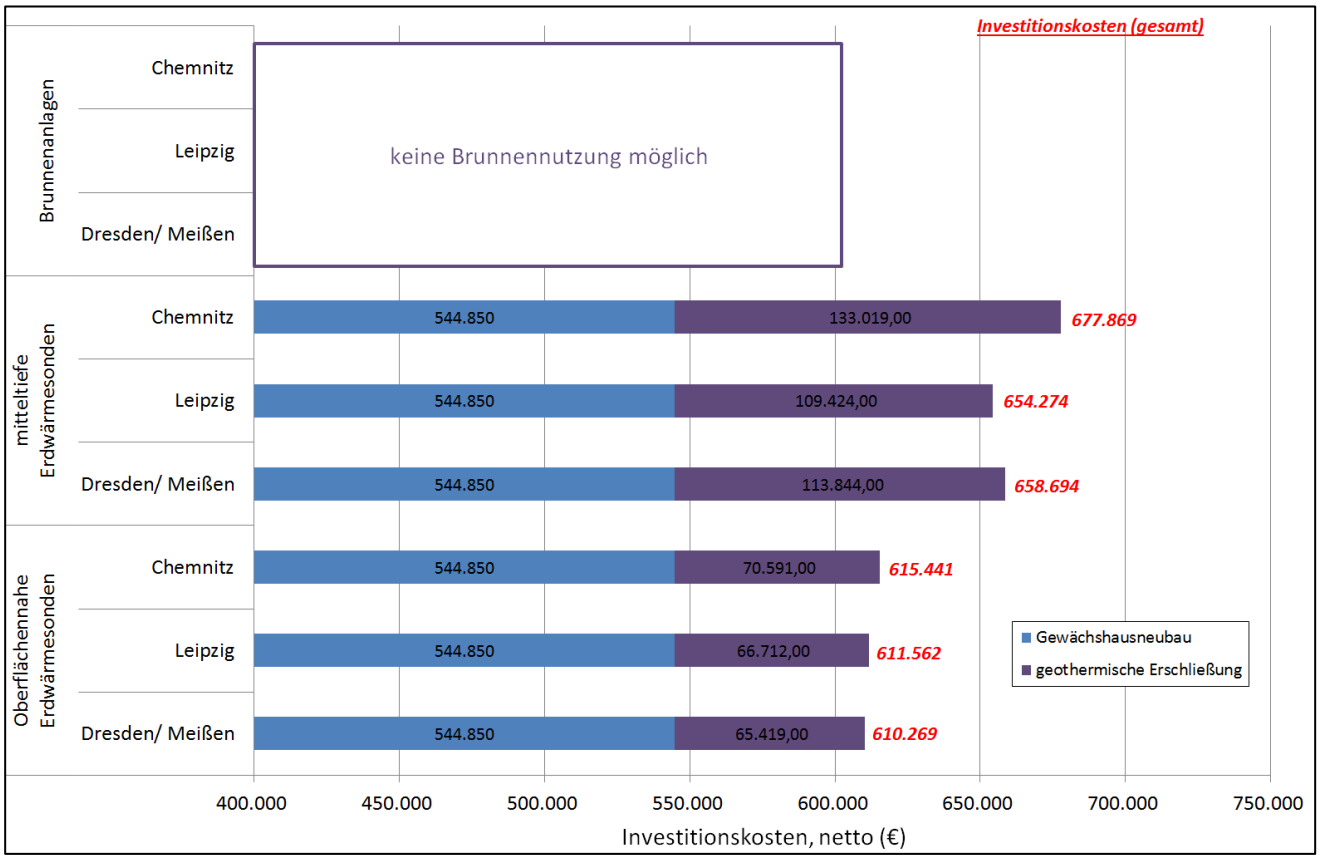



**Abbildung 100: Modellbetrieb D – Übersicht der gesamten Investitionskosten (netto) für den Gewächshausneubau**

### 8.3.3 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung Modellbetrieb D

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zum Modellbetrieb D ist für die verschiedenen Optionen der Beheizung im Anlagenband (5.4.2) zusammengefasst.

Wie zu erkennen ist, kann selbst für den konzipierten Betrieb mit sehr geringem Wärmebedarf keine wirtschaftliche Nutzbarkeit für eines der geothermischen Systeme abgebildet werden. Bei alleiniger Betrachtung der verbrauchsgebundenen Kosten sind die geothermischen Systeme stets konkurrenzfähig bzw. deutlich günstiger als konventionelle Heizsysteme (eine Ausnahme bildet auch hier die Steinkohle). Gravierend sind jedoch die kapital- und betriebsgebundenen Kosten. Sie sind erheblich höher als bei allen konventionellen Systemen.

Ursächlich dafür ist auch hier die bereits im vorangestellten Kapitel genannte Heizleistung der Wärmepumpen für den Spitzenlastfall von 120 kW. Diese nur für wenige Stunden im Jahr notwendige Heizleistung verteuert die Wärmequellenanlage erheblich, vor allem im Hinblick auf die bereits diskutierte, sehr groß bzw. aufwändig zu gestaltende Wärmepumpe und ihre Regelung.

Eine günstigere Prognose der Wirtschaftlichkeit wäre (bei Beibehaltung der Jahresheizarbeit) nur bei einer erheblich kleineren, an die Jahresheizarbeit angepassten Wärmepumpe im Bereich um ca. 10 … 20 kW Heizleistung denkbar. Hier lägen die Kosten für die Wärmepumpe nur noch bei ca. 8.000 bis 12.000 €. Für diese kleinen Leistungsgrößen war jedoch kein geeignetes Nutzungskonzept ableitbar. Jedoch wäre die Wirtschaftlichkeit selbst bei den genannten, kleineren Leistungsbereichen keinesfalls sichergestellt. Ohne die Forderung des Einsatzes regenerativer Energieträger (vergleich Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz [EEWärmeG] in

Fassung vom 07.08.2008, zuletzt geändert durch Artikel 14 G v. 21.07.2014 – BGBl. I S. 1066) ist selbst die Wirtschaftlichkeit kleinerer geothermischer Systeme schwer darstellbar. Sofern jedoch regenerative Energieträger zu gewissen Anteilen verwendet werden müssen und/oder neben der Heizkomponente auch eine effektive Gebäudekühlung relevant ist (welche – wenn nicht geothermisch – konventionell erfolgen muss), sind die geothermischen Systeme vielfach wirtschaftlich darstellbar.

## 8.4 Fördermöglichkeiten

### 8.4.1 Staatliche Förderung

Bei Modellstandort D handelt es sich um den Neubau eines Gewächshauses. Eine BAFA-Förderung (Erläuterung siehe z. B. Kapitel 5.4.1) ist somit für die Modellbetriebe D nicht möglich (nur Förderung Bestandsbau). Auch aus den KfW-Förderprogrammen „Erneuerbare Energien Premium“ und „Tiefengeothermie“ ergibt sich keine Aussicht auf Förderfähigkeit (siehe auch hier Kapitel 5.4.1).

Für den Modellbetrieb D ist somit eine staatliche Förderung der geothermischen Anlage nicht realistisch.

### 8.4.2 Sonstige Förderung

Neben der staatlichen Förderung besteht eine weitere, „indirekte“ Förderung in der Bezugsmöglichkeit vergünstigter Strompreise der Energieversorger. Hier sind zur Berechnung die Tarife der Envia Mitteldeutsche Energie AG angesetzt worden (Wärmepumpentarif und „normaler Tarif Ökostrom):

- Wärmepumpentarif Envia M: 16,2 Cent/kWh (netto)
- Tarif Profistrom 24 h (100 % Ökostrom): 19,0 Cent/kWh (netto)

## 8.5 Fazit Modellbetrieb D

Bei Modellbetrieb D handelt es sich analog zum Betrieb C um einen Gewächshausneubau. Ziel war es hier jedoch, im ersten Schritt eine optimale geothermische Nutzung zu ermitteln und darauf basierend ein geeignetes Nutzungskonzept/eine geeignete Nutzungskonzeption zu entwerfen. Randbedingung ist generell eine alleinige bzw. vollständige Nutzung der Geothermie für die Beheizung ohne ein zweites (konventionelles System).

Als Kulturen werden Bio-Tomaten als Sommerkultur und Bio-Feldsalat in den Wintermonaten vorgeschlagen, sodass das Gewächshaus im Winter bei einer Normaußentemperatur von -14 °C nur frostfrei (+1 °C) geheizt werden muss.

Im Vergleich zu den übrigen Modellbetrieben ist nur eine sehr geringe jährliche Heizarbeit von lediglich ca. 21.000 kWh erforderlich. Die nötige maximale Heizleistung fällt im Verhältnis dazu mit 138 kW jedoch sehr hoch aus.

Für den konzipierten Betrieb kann trotz des sehr geringen Wärmebedarfs keine wirtschaftliche Nutzbarkeit für eines der geothermischen Systeme abgebildet werden.

Ursächlich dafür ist in erster Linie die hohe (jedoch notwendige) Heizleistung der Wärmepumpen für den Spitzenlastfall. Diese nur für wenige Stunden im Jahr notwendige Heizleistung verteuert die Wärmequellenanlage

erheblich. Weil beispielsweise Spitzenlasten von mehr als 100 kW Heizleistung nur für insgesamt 22 Stunden jährlich notwendig und auch Leistungsanforderungen von mehr als 80 kW nur für 24 weitere Stunden im Jahr relevant sind, wäre zur Ergänzung des Wärmepumpenbetriebs die kurzzeitige Spitzenlastabdeckung durch ein zweites System sinnvoll. Dieses sollte in der Anschaffung und Unterhaltung vergleichsweise preiswert sein, weil es jeweils nur sehr kurzzeitig genutzt wird. Zur Unterstützung der Wärmepumpe könnte folglich selbst über den Einbau herkömmlicher Elektroheizstäbe in den Pufferspeicher nachgedacht werden. Weil es sich um eine robuste und nahezu wartungsfreie Technik handelt, welche auch ausschließlich auf die vorhandene Medienversorgung aufbaut (Stromanschluss), wäre der Einsatz von Elektroheizstäben eine technisch sehr einfache und praktikable Lösung. Die reinen Investitionskosten für eine elektrische Heizungsunterstützung mit beispielsweise 60 kW Heizleistung liegen etwa bei 1.000 Euro (netto).

# 9 Gesamtbewertung, Zusammenfassung

Zur Beheizung und Kühlung von Wohngebäuden, öffentlichen Einrichtungen und Bauten für Industrie und Gewerbe ist die Nutzung der Geothermie seit vielen Jahren Stand der Technik und wird daher routinemäßig angewendet. Bei geeignetem Nutzungsprofil sowie fachgerechter Planung und Realisierung ist die Geothermie als regenerative Energieform gegenüber konventionellen, fossilen Energieträgern konkurrenzfähig und auch aus ökologischer Sicht zukunftsweisend. Darüber hinaus ist sie praktisch jederzeit und überall verfügbar und beeinträchtigt die Nutzbarkeit der betreffenden Flächen kaum.

Obgleich bereits einige Musteranlagen der geothermischen Nutzung im Gartenbau existieren, kann nicht von einer breiten Anwendung der Geothermie im Gartenbau gesprochen werden. Hier dominieren in der Regel die klassischen, meist fossilen Heizsysteme. Dies ist unter anderem der Tatsache geschuldet, dass insbesondere im Gebäudebestand Vorlauftemperaturen des Heizsystems von teilweise mehr als 70 bis 80 °C erforderlich sind, die durch die klassische Wärmepumpentechnologie nicht mehr wirtschaftlich sinnvoll bereitgestellt werden können. Ausgedehnte, auf geringere Vorlauftemperaturen angepasste Flächenheizsysteme sind meist nicht vorhanden.

Für die Einschätzung der Möglichkeiten einer **breiten Anwendung** geothermischer Systeme, insbesondere **in sächsischen Gärtnereien** besteht daher Forschungsbedarf vor allem in Bezug auf eine systemische Gesamtbewertung der geothermischen Nutzungsvarianten einerseits und der Betriebsweise der Gewächshäuser andererseits in Abhängigkeit verschiedener regionalgeologischer Standortgegebenheiten.

Vor diesem Hintergrund sind die Einsatzmöglichkeiten der drei verschiedenen geothermischen Entzugssysteme

- Oberflächennahe Erdwärmesonden,
- Mitteltiefe Erdwärmesonden und
- Geothermische Brunnenanlagen

für vier verschiedene Gartenbaubetriebe untersucht worden. Es handelt sich dabei um die nachfolgenden Betriebsstrukturen bzw. fiktiven Modellbetriebe

- Modellbetrieb A: Historisch gewachsene Einzelhandelsgärtnerei (Zierpflanzenbau),
- Modellbetrieb B: Spezialisierter Gemüsebaubetrieb (Tomaten/Gurken),

- Modellbetrieb C: Energieoptimierter **Neubau** einer Einzelhandelsgärtnerei (Zierpflanzenbau),
- Modellbetrieb D: Entwicklung einer bestmöglichen Betriebsstruktur und eines Nutzungskonzeptes (Zierpflanzen und/oder Gemüsebau) für die optimale Geothermienutzung auf einer vorgegebenen Betriebsfläche.

Bei den Betrieben A und B handelt es sich somit um Bestandsbauten, die Betriebe C und D sind Neubauten.

Für alle vier Modellbetriebe waren die Wärmequellensysteme unter Beachtung des zu ermittelnden Energiebedarfs für je zwei verschiedene Varianten der Grund- und Spitzenlastverteilung (konventionelles Heizsystem/Geothermie) zu berechnen. Neben der detaillierten Ausweisung der erwarteten Baukosten (bei den Modellbetrieben C und D einschließlich der Kosten für die bauliche Errichtung der Gewächshäuser nebst kompletter Ausstattung) erfolgten auch ausführliche Betrachtungen zur technischen und wirtschaftlichen Realisierbarkeit und zur ökologischen Bilanz der geothermischen Systeme im Vergleich mit einer konventionellen Beheizung.

Um regional variierende geologische Standortverhältnisse in Sachsen zu vergleichen, ist jeder Modellbetrieb separat an drei verschiedenen Regionaltypen untersucht worden:

- Region X: Raum Dresden/Meißen – Lockergesteins-/Festgesteinstyp mit Grundwasserströmung
- Region Y: Raum Leipzig – Lockergesteinstyp mit Grundwasserströmung
- Region Z: Raum Chemnitz – Festgesteinstyp

Die vorliegende Untersuchung stellt somit eine Beratungshilfe für sächsische Gartenbaubetriebe dar, die es ermöglicht, regional spezifisch und nutzungsorientiert die Einsatzmöglichkeiten geothermischer Energie aus technischer, wirtschaftlicher und ökologischer Sicht grundsätzlich zu überprüfen. Sie ersetzt jedoch in keinem Fall eine detaillierte Planung der jeweiligen Einzelanlage.

Für den **Modellbetrieb A** (bestehende Gärtnerei im Zierpflanzenbereich mit vorwiegender Direktvermarktung) sind aus technischer Sicht alle drei geothermischen Entzugssysteme möglich. Eine Ausnahme bildet jedoch die Modellregion Z (Raum Chemnitz, Festgesteinsbereich). Dort ist generell keine Nutzung der geothermischen Brunnenanlagen möglich, aufgrund von nicht vorhandenen bzw. nutzbaren Grundwasserleitern.

Bei einem Gesamtwärmebedarf des Objekts in Höhe von 529.653 kWh und einer maximal notwendigen Heizleistung von 470 kW ergibt sich für die

- **Leistungsvariante I – bivalent paralleler Betrieb** – eine Heizleistung der Wärmepumpe von 140 kW und eine abdeckbare Heizarbeit von 470.332 kWh (Lastabdeckung zu 89 %). Im
- **bivalent alternativen Betrieb (Leistungsvariante II)** ist bei gleicher Heizleistung der Wärmepumpe eine Heizarbeit von 311.152 kWh (50 % Lastabdeckung) realisierbar.

Im Hinblick auf die reinen Herstellungskosten inkl. Wärmepumpe und Einbindung in das vorhandene Wärmenetz belaufen sich diese (je nach Wärmequelle und Standort) beim

- **bivalent parallelen Betrieb** auf ca. 383.700 € … 810.100 € und beim
- **bivalent alternativen Betrieb** auf ca. 177.300 € … 472.600 €.

Das preiswerteste geothermische System stellen dabei die oberflächennahen Erdwärmesonden dar. Die geothermischen Brunnenanlagen folgen an zweiter Stelle. Weil jedoch für beide Modellregionen (X und Y) eine

Wasseraufbereitung für die Brunnenanlagen erforderlich ist (Enteisenung, Entmanganung), entfallen allein darauf erhebliche Kosten für Errichtung und Betrieb/Wartung. Die mitteltiefen Erdwärmesondenanlagen stellen durchweg das mit Abstand teuerste System dar und bilden sich in keiner Modellregion als wirtschaftlich interessante Alternative ab.

Bei gesamtheitlicher Wirtschaftlichkeitsbetrachtung, auch im Vergleich mit konventionellen Energieträgern, zeigt sich, dass die konventionellen, monovalenten Systeme auf der Basis von Pellets, Erdgas und allen voran Steinkohle im Vergleich mit den bivalenten Systemen unter Einbeziehung der Geothermie wirtschaftlicher abschneiden. So fallen die Wärmegestehungskosten bei alleiniger Steinkohlenutzung um etwa die Hälfte bis ein Drittel geringer aus als bei den bivalenten Systemen unter Einbeziehung der Geothermie.

Eine Umstellung der Grundlastabdeckung über die Geothermie ist somit nur für Betriebe mit bislang monovalenter Heizölnutzung wirtschaftlich interessant. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn sich der Anstieg der Energiepreise (insbesondere für Heizöl) weiter erhöht. Für die Modellregionen X und Y ergibt sich die Amortisierung für den Fall einer Energiepreissteigerung von 30 % jeweils nach etwa 7 bis 8 Jahren, in der Modellregion Z ist dies (aufgrund der höheren Investitionskosten) erst nach 10 Jahren der Fall. Bei gleichbleibendem Preisanstieg sind nur die bivalent alternativen Varianten wirtschaftlich (Amortisierung in den Regionen X und Y binnen ca. 10 bzw. 12 Jahren). Die bivalent parallelen Varianten amortisieren sich innerhalb der gesetzten Zeitspanne von 15 Jahren nur bei einer Verteuerung der Energiepreise.

Für den **Modellbetrieb B** (bestehende Gewächshausanlage im Gemüseanbau – Gurken und Tomaten) konnte ein Gesamtenergiebedarf in Höhe von 5.900 kW (bzw. ca. 5,4 Mio. kWh pro Jahr) ausgewiesen werden. Grundsätzlich ist nur ein bivalenter Betrieb möglich, wobei in der ersten Variante der bivalent parallele Betrieb berücksichtigt wurde, in der zweiten Variante der bivalent alternative. Die Heizleistung der Wärmepumpe liegt jeweils bei 700 kW, wobei beim bivalent parallelen Betrieb ca. 55 % der Heizarbeit abgedeckt werden, beim alternativen Betrieb lediglich ca. 15 %.

Aufgrund der Größe des Betriebs, der energetischen Anforderungen und der baulichen Ausführung ist die Nutzung oberflächennaher und mitteltiefer Erdwärmesonden an keinem Standort möglich bzw. wirtschaftlich. Ursächlich dafür sind die erheblichen Investitionskosten und die nicht durchweg ausreichenden Platzverhältnisse für die Errichtung der Anlagen.

Weil in der Modellregion Z aufgrund der geologisch/hydrogeologischen Verhältnisse keine Brunnenanlagen möglich sind, scheidet für diese Betriebsstruktur in der genannten Region eine Geothermienutzung aus.

Für die Lockergesteinsbereiche (Modellregion X und Y) sind bei der größeren Lastvariante des bivalent parallelen Betriebs ebenfalls keine Brunnenanlagen möglich. Lediglich für die bivalent alternative Betriebsweise (15 % Lastabdeckung) ist die offene Grundwassernutzung über Brunnen als alleinige geothermische Erschließungsoption für den Modellbetrieb B möglich. Die Kosten dafür liegen je nach Standort zwischen etwa 550.000 bis 600.000 €.

Aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten kann bei Bestandsanlagen auf der Basis von Erdgas, Steinkohle oder Pellets keine Kosteneinsparung durch ein bivalentes System unter Einbeziehung der geothermischen Brunnenanlagen in Aussicht gestellt werden. Lediglich bei Bestandsanlagen, die mit Heizöl beheizt werden, ist die Einbeziehung der Wärmepumpensysteme wirtschaftlich denkbar. Dies gilt jedoch nur, wenn die Preissteigerung der Energieträger analog der letzten Jahre verläuft bzw. weiter ansteigt (dann sind Amortisationszeiten zwischen etwa 7 und 12 Jahren realistisch). Im Fall einer Abschwächung des Preisanstiegs gibt es praktisch

keine wirtschaftliche Nutzbarkeit. Die Wärmegestehungskosten des bivalenten Systems Heizöl/Wärmepumpe liegen z. B. bei gleichbleibender Entwicklung der Energiekosten für beide Modellregionen bei 0,14 €/kWh, bei alleiniger Nutzung von Heizöl bei 0,15 €/kWh.

**Modellbetrieb C** stellt einen energetisch optimierten Gewächshausneubau dar, der im Nutzungsprofil dem Modellbetrieb A entspricht (Zierpflanzenbetrieb mit Direktvermarktung). Das Gewächshaus in Venlo-Blockbauweise verfügt über vier Produktionsabteile mit einer Nutzfläche von 1.612,8 m². Insgesamt liegt die Bruttogrundfläche bei ca. 2.458 m².

Die berechnete, insgesamt erforderliche Heizleistung beträgt 240 kW (Heizarbeit: 238.057 kWh im Jahr). Es sind zwei verschiedene Grund- und Spitzenlastszenarien – beide für bivalent parallelen Betrieb – untersucht worden:

- Variante I: Heizleistung der Wärmepumpe von 30 kW (Abdeckung der Jahresheizarbeit von 59 %)
- Variante II: Heizleistung der Wärmepumpe von 70 kW (Abdeckung der Jahresheizarbeit von 91 %).

Mit Ausnahme der geothermischen Brunnenanlagen am Standort Z sind aus technischer Sicht alle Wärmequellensysteme an jedem Standort möglich.

Im Ergebnis der Betrachtungen wird deutlich, dass die oberflächennahen Erdwärmesondenanlagen jeweils die kostengünstigste Variante darstellen. Die gesamten Investitionskosten liegen bei den untersuchten energetischen Szenarien an allen Standorten vergleichsweise einheitlich bei ca. 1,4 Mio. Euro.

Bei gesamtheitlicher Wirtschaftlichkeitsbetrachtung, auch im Vergleich mit konventionellen Energieträgern, ergibt sich folgendes Bild:

Die monovalente Beheizung über Steinkohle oder Erdgas stellt die wirtschaftlichste Lösung dar. Bei Beibehaltung der Preisentwicklung der letzten Jahre liegen die Wärmegestehungskosten hier bei 0,142 €/kWh bzw. 0,15 €/kWh. Der jährliche $CO_2$-Ausstoß beider Varianten ist jedoch mit ca. 134 t bzw. 68 t höher als bei den bivalenten Systemen.

Reine Pelletkesselanlagen sind meist teurer als die bivalenten Versorgungskonzepte. Die Kombination aus Heizöl und oberflächennahen Erdwärmesonden ist im Vergleich mit einer monovalenten Heizölnutzung vielfach wirtschaftlich interessant. Trotz der Investitionskosten der Erdwärmeanlagen rechnen sich diese bivalenten Systeme (je nach Entwicklung der Energiekosten) oft nach etwa vier bis acht Jahren. Wärmepumpenanlagen, die auf mitteltiefen Erdwärmesonden oder geothermischen Brunnenanlagen basieren, sind generell nicht wirtschaftlich.

Bei **Modellbetrieb D** handelt es sich analog zum Betrieb C um einen Gewächshausneubau. Ziel war es hier jedoch, im ersten Schritt eine optimale geothermische Nutzung zu ermitteln und darauf basierend ein geeignetes Nutzungskonzept/eine geeignete Nutzungskonzeption zu entwerfen. Randbedingung ist generell eine alleinige bzw. vollständige Nutzung der Geothermie für die Beheizung ohne ein zweites (konventionelles System).

Als Kulturen werden Bio-Tomaten als Sommerkultur und Bio-Feldsalat in den Wintermonaten geplant, sodass das Gewächshaus im Winter bei einer Normaußentemperatur von -14 °C nur frostfrei (+1 °C) geheizt werden muss.

Im Vergleich zu den übrigen Modellbetrieben ist nur eine sehr geringe jährliche Heizarbeit von lediglich ca. 21.000 kWh erforderlich. Die nötige maximale Heizleistung fällt im Verhältnis dazu mit 138 kW jedoch sehr hoch aus.

Für den konzipierten Betrieb kann trotz des sehr geringen Wärmebedarfs keine wirtschaftliche Nutzbarkeit der geothermischen Systeme abgebildet werden. Ursächlich dafür ist in erster Linie die hohe (jedoch notwendige) Heizleistung der Wärmepumpen für den Spitzenlastfall. Diese nur für wenige Stunden im Jahr notwendige Heizleistung verteuert die Wärmequellenanlage erheblich.

Eine staatliche Förderung ist allein für die Modellbetriebe A und B zu erwarten. Diese fällt jedoch im Vergleich zu den gesamten Investitionskosten sehr gering aus.

Abschließend und im Ergebnis aller durchgeführten Betrachtungen zeigt sich, dass die Nutzung der Geothermie zur Gewächshausbeheizung für Bestandsbauten teilweise wirtschaftlich darstellbar ist. Dies gilt in erster Linie für bestehende Heizölkessel. Aufgrund der erheblichen Verteuerung des Heizöls in den letzten Jahren zeigen sich hier wirtschaftlich interessante Alternativen bivalenter Systeme aus Geothermie (Grundlast) und Heizöl (Spitzenlast). Dies gilt insbesondere, wenn der Preisanstieg des Heizöls wie in den letzten Jahren bleibt bzw. zukünftig noch stärker ausfällt.

Die $CO_2$-Bilanz der bivalenten Systeme fällt um ein Vielfaches günstiger aus als beim wirtschaftlich billigsten System (Steinkohle). Im direkten Vergleich dieses fossilen Energieträgers mit dem meist wirtschaftlichsten bivalenten System aus Heizöl und Wärmepumpe liegen die jährlichen $CO_2$-Einsparungen (selbst ohne Nutzung von Ökostrom, sondern des deutschen Strommixes – Wärmepumpenstrom) jeweils um 50 %. So werden beispielsweise für den Modellbetrieb B jährlich etwa 1.400 t $CO_2$ eingespart. Unterschiede zwischen Sole-Wasser-Wärmepumpen (beide Erdwärmesondensysteme) und Wasser-Wasser-Wärmepumpen (Brunnenanlagen) sind hier kaum vorhanden. Zwar ist die Jahresarbeitszahl bei den Wasser-Wasser-Wärmepumpen höher, jedoch muss dort noch die Leistungsaufnahme der Brunnenpumpen hinzugerechnet werden, was diesen scheinbaren Effizienzvorteil wieder aufhebt.

Auch für einen energetisch optimierten Neubau zeigt sich ein sehr ähnliches Bild. Die monovalente Beheizung über Kohle oder Erdgas ist wirtschaftlich am günstigsten. Das bivalente System Heizöl/Geothermie ist wirtschaftlich und ökologisch gut darstellbar, die Kosten können mit der Steinkohle jedoch nicht standhalten. Dort ist allerdings die $CO_2$-Bilanz wiederum deutlich ungünstiger gegenüber dem bivalenten System Heizöl/Wärmepumpe.

Aus geologisch/hydrogeologischer bzw. geothermischer Sicht sind die günstigsten Standortverhältnisse für die Nutzung der Geothermie in den Modellregionen X und Y gegeben. Dort sind die Untergrundtemperaturen deutlich höher als in der Modellregion Z, zudem fällt auch die teufenabhängige Temperaturzunahme signifikant höher aus. Auch der zusätzlich vorhandene konvektive Wärmetransport im Untergrund durch die vorhandenen Grundwasserleiter wirkt sich positiv aus. Im direkten Vergleich der Modellregionen X und Y zeigen sich wiederum vielfach leicht günstigere Verhältnisse in der Modellregion X. Die im Untergrund anstehenden Gesteine weisen im Vergleich zu denen in der Modellregion Y meist etwas höhere Wärmeleitfähigkeitswerte auf (in der Region X fehlt z. B. die sehr schlecht wärmeleitfähige Braunkohle). Zudem ist auch der konvektive Wärmetransport in der Modellregion X auf den oberen 150 m in Summe höher als in der Modellregion Y. Generell ist der Unterschied zwischen diesen beiden Regionen jedoch eher gering im Vergleich zu den Unterschieden zur Modellregion Z.

Als favorisiertes geothermisches System haben sich mehrheitlich die oberflächennahen Erdwärmesonden herausgestellt. Die mitteltiefen geschlossenen Systeme lassen sich (trotz vielfach geringerer Gesamtbohrmeter) aufgrund hoher Material- und Bohrkosten nicht wirtschaftlich darstellen. Geothermische Brunnenanlagen sind aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten vielfach etwas ungünstiger als die oberflächennahen Erdwärmesonden, mitunter aber auch etwa gleichwertig (vereinzelt sogar günstiger – z. B. für Modellbetrieb A in der Region X bei bivalent parallelem Betrieb [Vergleichsszenario: monovalent Heizöl zu bivalent Heizöl/Wärmepumpe]). Hier ist jedoch generell zu beachten, dass für beide Modellregionen mit Lockergesteinsbedeckung eine Aufbereitung des Grundwassers (Enteisenung/Entmanganung) bei geothermischer Brunnennutzung erforderlich ist. Der Umfang dafür ist in der Modellregion Y aufgrund der höheren Grundwassermineralisation (vor allem höhere Eisenkonzentrationen) höher. Bei gesamtheitlicher Betrachtung sind die oberflächennahen Erdwärmesonden somit zu bevorzugen. Eine Ausnahme bildet der Modellbetrieb B, welcher aufgrund seiner Größe nur für geothermische Brunnenanlagen geeignet ist.

Eine breite Anwendung der Geothermie zur Beheizung von Gewächshäusern ist somit unter den aktuellen Verhältnissen (staatliche Förderung, Entwicklung der Strompreise bzw. der Preise für konventionelle Energieträger) auch zukünftig schwer darstellbar. Sie bietet jedoch aus ökologischer und wirtschaftlicher Sicht interessante, bivalente Nutzungsoptionen, vor allem bei Heizöl-basierten Kesselanlagen. Auch für gut wärmegedämmte, moderne Neubauten zeigen sich interessante und wirtschaftliche Nutzungskonzepte. Eine monovalente geothermische Beheizung von Gewächshäusern ist aufgrund der hohen Spitzenlastanforderung nicht realistisch.

Forschungs-/Optimierungspotenzial wird in erster Linie im Gewächshausneubau bzw. bei der energetischen Sanierung von Bestandsbauten gesehen. Vor allem die Abführung, Speicherung und Nutzung des immensen solaren Energieeintrags in die Gewächshäuser stellen ein bislang nicht genutztes, hinsichtlich der technischen Realisierung aber auch anspruchsvolles Potenzial dar. Auch die Kombination bzw. energetische Vernetzung von Gewächshausanlagen mit explizit kühlbedürftigen Bauwerken lässt positive wirtschaftliche und ökologische Tendenzen erwarten.

Weil sich die geothermische Bereitstellung der notwendigen Spitzenlasten als kritischer Faktor erwiesen hat, wird ein weiterer Forschungsschwerpunkt auch in der Optimierung des Anbauspektrums gesehen. Die Toleranz bestimmter Kulturen für kurzzeitige auftretende Temperaturen unter 0 °C würde die notwendigen Spitzenlasten deutlich reduzieren, was wiederum zur Verkleinerung der geothermischen Systeme führen würde.

Bestmögliche, praxisnahe Untersuchungen zur Optimierung des Anbauspektrums, der baulichen Ausführung eines Gewächshauses und der Wärmequellenanlage könnten beispielsweise in Form eines Versuchsgewächshauses in der günstigsten Standortregion (Raum Dresden/Meißen) mit dem optimalen Entzugssystem (oberflächennahe Erdwärmesonden) erfolgen. Hier könnte beispielsweise auch das Verhalten der Sondenanlage auf extrem kurzzeitige Lastspitzen untersucht und entsprechend optimiert werden.

Abschließend wird noch einmal darauf hingewiesen, dass für alle baulichen/gartenbaulichen Anlagen (Erweiterungen/Umbauten und Neubauten) sowie für die geothermischen Entzugssysteme eine fachlich fundierte Gesamtplanung unerlässlich ist, um ein nachhaltig funktionssicheres und effizientes Gesamtsystem zu garantieren.

# 10 Literaturverzeichnis


DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (1983): DIN 4701 (zurückgezogen) – Regeln für die Berechnung des Wärmebedarfs von Gebäuden. – Beuth Verlag GmbH, Berlin.

DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2003): DIN EN 12831 – Heizungsanlagen in Gebäuden, Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast. – Beuth Verlag GmbH, Deutsche Fassung, Berlin.

Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Jugend, Familie und Gesundheit (1999): Heizenergie im Hochbau – Leitfaden energiebewusste Gebäudeplanung.- Elektra, Niedernhausen.

KTBL (2013): Individuelle Kalkulation des Investitionsbedarfs für Gewächshausanlagen.- Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft, Darmstadt.

LfULG (2014): Informationsbroschüre zur Nutzung oberflächennaher Geothermie, 5. Auflage, Dresden.

LfULG (2011): Tiefengeothermie Sachsen. – Schriftenreihe, Heft 9/2011, Dresden.

MERKEL, B. J. & PLANER-FRIEDRICH, B. (2002): Grundwasserchemie.- Springer Verlag, Berlin.

MEYER, J. & PIETZSCH, M. (2011): Nutzung der Restwärme einer Geothermie-Anlage zur $CO_2$-neutralen Beheizung eines Gewächshauskomplexes.- Abschlussbericht Projekt 06UM009, Technische Universität München, Weihenstephan.

RATH, T. (2005): Hortex und Hortexlight.- http://www.itg.uni-hannover.de/software/software.htm.

Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft (2007): Energiekonzepte für den Gartenbau.- Schriftenreihe der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft, Heft 20/2007, Dresden.

SEF – Energietechnik GmbH (2011): Erarbeitung von allgemeinen Empfehlungen zur Verbesserung der Energiebilanz in sächsischen Zierpflanzenbaubetrieben. – Abschlussbericht zum Forschungsprojekt: 110, Zwickau.

Statistisches Bundesamt (2014): Daten zur Energiepreisentwicklung, lange Reihen von Januar 2000 bis September 2014.- Statistisches Bundesamt, Wiesbaden.

Statistisches Bundesamt (2005): Ergebnisse der Gartenbauerhebung 2005.- Statistisches Bundesamt, Wiesbaden.

TANTAU, H.-J. et al. (2014): Zukunftsinitiative NiedrigEnergieGewächshaus (ZINEG) – Ansätze und Ergebnisse.-KTBL, Darmstadt.

VDI (2012): VDI 2067, Blatt 1 - Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen - Grundlagen und Kostenberechnung.- Beuth Verlag GmbH, Düsseldorf.

VDI (2001): VDI 4640, Blatt 2 – Thermische Nutzung des Untergrundes - Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen.- Beuth Verlag GmbH, Düsseldorf.

VDI (2010): VDI 4640, Blatt 1 – Thermische Nutzung des Untergrundes – Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte.- Beuth Verlag GmbH, Düsseldorf.

VDI (2010): VDI 4640, Blatt 4 – Thermische Nutzung des Untergrundes – Direkte Nutzungen.- Beuth Verlag GmbH, Düsseldorf.

**Herausgeber:**
Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG)
Pillnitzer Platz 3, 01326 Dresden
Telefon: +49 351 2612-0
Telefax: +49 351 2612-1099
E-Mail: lfulg@smul.sachsen.de
www.smul.sachsen.de/lfulg

**Autoren:**
Marcus Richter, Katrin Reinhardt, Axel Gerschel
HGC Hydro-Geo-Consult GmbH Freiberg
Dr. Christian Huber, Hendrik Wachmann
GEFOMA GmbH Großbeeren

**Redaktion:**
Karina Hofmann
LfULG, Abteilung Geologie/Projektgruppe Geothermie
Halsbrücker Str. 31a, 09599 Freiberg
Telefon: +49 3731 294-1409
Telefax: +49 3731 294-1099
E-Mail: karina.hofmann@smul.sachsen.de

Stephan Wartenberg
LfULG, Abteilung Gartenbau/Referat Zierpflanzenbau
Lohmener Str. 10, 01326 Dresden Pillnitz
Telefon: +49 351 2612-8200
Telefax: +49 351 2612-8099
E-Mail: stephan.wartenberg@smul.sachsen.de

**Fotos:**
Autorengemeinschaft und LfULG (2014)

**Redaktionsschluss:**
27.02.2015

**ISSN:**
1867-2868

**Hinweis:**
Die Broschüre steht nicht als Printmedium zur Verfügung, kann aber als PDF-Datei unter https://publikationen.sachsen.de/bdb/ heruntergeladen werden.

Verteilerhinweis
Diese Informationsschrift wird von der Sächsischen Staatsregierung im Rahmen ihrer verfassungsmäßigen Verpflichtung zur Information der Öffentlichkeit herausgegeben.
Sie darf weder von Parteien noch von deren Kandidaten oder Helfern im Zeitraum von sechs Monaten vor einer Wahl zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für alle Wahlen.
Missbräuchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist auch die Weitergabe an Dritte zur Verwendung bei der Wahlwerbung. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die vorliegende Druckschrift nicht so verwendet werden, dass dies als Parteinahme des Herausgebers zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte.
Diese Beschränkungen gelten unabhängig vom Vertriebsweg, also unabhängig davon, auf welchem Wege und in welcher Anzahl diese Informationsschrift dem Empfänger zugegangen ist. Erlaubt ist jedoch den Parteien, diese Informationsschrift zur Unterrichtung ihrer Mitglieder zu verwenden.