

Sondes géothermiques
Sonde geotermiche

Erdwärmesonden

384/6

Referenznummer
SN 546384/6:2010 de

Gültig ab 2010-01-01

Herausgeber
Schweizerischer Ingenieur- und
Architektenverein
Postfach, CH-8027 Zürich

Allfällige Korrekturen und Kommentare zur vorliegenden Publikation sind zu finden unter www.sia.ch/korrigenda.

Der SIA haftet nicht für Schäden, die durch die Anwendung der vorliegenden Publikationen entstehen können.

2009-11 1. Auflage

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
Vorwort	4
0 Geltungsbereich	5
0.1 Abgrenzung	5
0.2 Normative Verweisungen	5
0.3 Abweichungen	6
1 Verständigung	7
1.1 Allgemeines	7
1.2 Definitionen	7
1.3 Bezeichnungen, Begriffe und Einheiten	12
1.4 Indizes	13
2 Projektierung	14
2.1 Allgemeines	14
2.2 Nutzungsarten	14
2.3 Standort	14
3 Berechnung und Auslegung	17
3.1 Anforderungen an die Auslegung von Erdwärmesonden	17
3.2 Berechnung der Erdwärmesonden	17
3.3 Auslegung und Hydraulikberechnung des Erdwärmesondenkreislaufs	19
3.4 Grundsätze der Systemoptimierung	21
4 Anforderungen an Baustoffe und Konstruktion	22
4.1 Erdverlegtes Rohrmaterial	22
4.2 Verbindungstechnik	22
4.3 Abdichtung	23
4.4 Wärmedämmung	23
4.5 Wärmeträger	23
4.6 Sicherheitseinrichtung	23
4.7 Messgrößen für den Betrieb	24
5 Ausführung	25
5.1 Bohrausrüstung	25
5.2 Bohrung	25
5.3 Einbau	25
5.4 Hinterfüllung	25
5.5 Anschluss der Erdwärmesonde	26
5.6 Füllen der Erdwärmesonde	26
5.7 Dokumentation auf der Anlage	26
6 Prüfungen	27
6.1 Prüfung der Erdwärmesonde	27
6.2 Rohrverbindungen zwischen Erdwärmesonden und Wärmepumpe	27
6.3 Frostschutz	27
7 Betrieb und Wartung	28
7.1 Wartung	28
7.2 Abweichung des Wärmebedarfs	28
7.3 Bauheizung	28
7.4 Bauaustrocknung	28
7.5 Stilllegung	28

	Seite
Anhang	
A Protokolle und Bohrprofil	29
A.1 Bohrprotokoll (normativ)	29
A.2 Prüf- und Abnahmeprotokoll (normativ)	30
A.3 Geologisches Bohrprofil (informativ)	31
B (normativ) Prüfungen	32
B.1 Durchflussprüfung	32
B.2 Dichtheitsprüfung in Anlehnung an SN EN 805	33
C (informativ) Kennwerte	36
C.1 Allgemeines	36
C.2 Bodentemperatur und Bodenoberflächentemperatur	36
C.3 Boden- und Stoffkennwerte	39
C.4 Wärmeträger	41
D (informativ) Projektierungshinweise ..	42
D.1 Bewilligung	42
D.2 Geologie	42
D.3 Vereinfachtes Berechnungsverfahren für einfache Anlagen	42
D.4 Berechnungsverfahren für komplexe Anlagen	56
D.5 Druckverlustberechnung	56
E (normativ) Ausrüstung der Bohrunternehmung	63
E.1 Allgemeines	63
E.2 Standardausrüstung	63
E.3 Ausrüstung zur Arteserintervention ...	63
E.4 Ausrüstung zur Gasintervention	64
F (informativ) Ausführung	65
F.1 Allgemein	65
F.2 Bohrverfahren	65
F.3 Hinterfüllung	67
F.4 Anschluss der Erdwärmesonden	69
F.5 Spüldauer	71
G Publikationen	72

VORWORT

Die vorliegende Norm ist massgebend für Planung, Ausführung und Betrieb von Erdwärmesonden (EWS), welche das Wärmepotenzial des Untergrundes zu Heiz- und Kühlzwecken von Gebäuden nutzen. Ziel ist es, die Anforderungen und Qualitätskriterien an das Bauwerk und die Abgrenzung gegenüber anderen Gewerken zu regeln, um dem Bauherrn ein über die gesamte berechnete Nutzungsdauer funktionierendes Gesamtsystem übergeben zu können. Die Norm ist in erster Linie für Planer und Ausführende gedacht, enthält aber auch Hinweise für Bauherren (Kapitel 2, 5, 6 und 7).

Seit 1984 sind in der Reihe *Dokumentation SIA* zahlreiche für die Nutzung untiefer Geothermie relevante Publikationen erschienen.

Die im Jahre 2009 veröffentlichte Vollzugshilfe *Wärmenutzung aus Boden und Untergrund* des Bundesamts für Umwelt BAFU behandelt Erdwärmesonden vorwiegend nach gewässerschutzrechtlichen Aspekten. Weitere Richtlinien stammen insbesondere vom damaligen Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL (*Wegleitung Grundwasserschutz*, 2004) und von mehreren Kantonen und Verbänden (Arbeitsgemeinschaft Wärmepumpen AWP, Fördergemeinschaft Wärmepumpen Schweiz FWS usw.). Allerdings wurden in der Schweiz die technischen Aspekte für Planung, Ausführung und Betrieb verschiedener Typen von Geothermieanlagen bis heute normativ nicht vollständig behandelt.

Das gilt auch für unsere Nachbarländer, mit der Ausnahme von Deutschland, wo der Verein Deutscher Ingenieure VDI die Richtlinie VDI 4640 *Thermische Nutzung des Untergrundes* herausgegeben hat.

Um diese Lücke zu schliessen, haben sich das Bundesamt für Energie BFE, die Fördergemeinschaft Wärmepumpen Schweiz FWS und die Schweizerische Vereinigung für Geothermie SVG an den SIA gewandt, um eine Schweizer Norm für den Bereich der Erdwärmesonden auszuarbeiten.

Kommission SIA 384/6

0 GELTUNGSBEREICH

0.1 Abgrenzung

- 0.1.1 Die vorliegende Norm gilt für alle geschlossenen Erdwärmesonden und Erdwärmesondenfelder bis in eine Tiefe von 400 m unter der Erdoberfläche. Die Nutzung umfasst Heizen und Kühlen von Gebäuden, unterirdische Wärmespeicherung, Betrieb mit oder ohne Wärmepumpe, monovalenten Betrieb oder eine Kombination mit anderen Energiequellen (siehe 1.1).
- 0.1.2 Die vorliegende Norm befasst sich mit dem Primärkreis von Sole-Wasser-Wärmepumpen (Erdwärmesondenkreis), wobei der Eingang der Wärmepumpe die Systemgrenze bildet. Als Wärmequellen werden lediglich Erdwärmesonden betrachtet. Als Nutzungsszenarien werden sowohl der Wärmeentzug aus dem Untergrund (Heizbetrieb) als auch der Wärmeeintrag in den Untergrund (Kühlbetrieb) behandelt.
- 0.1.3 Nicht in dieser Norm behandelt werden Nutzungsarten wie Energiepfähle, Erdregister, Grundwasser-Wärmeübertrager, Erdwärmekörbe oder tiefe Erdwärmesonden. Ebenso ist die Auslegung der Wärmepumpe und des Wärmeverteilungsnetzes nicht Bestandteil dieser Norm.

0.2 Normative Verweisungen

Im Text dieser Norm wird auf die nachfolgend aufgeführten Publikationen verwiesen, welche im Sinne der Verweisungen ganz oder teilweise mitgelten.

0.2.1 Publikationen des SIA

Norm SIA 380/1	Thermische Energie im Hochbau
Norm SIA V382/2	Kühlleistungsbedarf von Gebäuden
Norm SIA 384/1	Heizungsanlagen in Gebäuden – Grundlagen und Anforderungen
Norm SIA 384.201	Heizungsanlagen in Gebäuden – Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast. SN EN 12831:2003
Norm SIA 480	Wirtschaftlichkeitsrechnung für Investitionen im Hochbau
Merkblatt SIA 2024	Standard-Nutzungsbedingungen für die Energie- und Gebäudetechnik
Merkblatt SIA 2028	Klimadaten für Bauphysik, Energie- und Gebäudetechnik

0.2.2 Internationale Normen

SN EN 805	Wasserversorgung – Anforderungen an Wasserversorgungssysteme und deren Bauteile ausserhalb von Gebäuden
SN EN 10204	Metallische Erzeugnisse – Arten von Prüfbescheinigungen
SN EN 14511-1	Luftkonditionierer, Flüssigkeitskühlsätze und Wärmepumpen mit elektrisch angetriebenen Verdichtern für die Raumbeheizung und Kühlung – Teil 1: Begriffe

0.2.3 Richtlinien und Wegleitungen

BAFU	Wärmenutzung aus Boden und Untergrund, Vollzugshilfe für Behörden und Fachleute im Bereich Erdwärmenutzung, Bundesamt für Umwelt, Bern, 2009
BUWAL (BAFU)	Wegleitung Grundwasserschutz, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL, heute BAFU Bundesamt für Umwelt), Bern, 2004
DVS 2207-1	Schweissen von thermoplastischen Kunststoffen – Heizelementschweissen von Rohren, Rohrleitungsteilen und Tafeln aus PE-HD. Deutscher Verband für Schweissen und verwandte Verfahren e.V. (DVS), Düsseldorf

0.3 Abweichungen

Abweichungen von der vorliegenden Norm sind zulässig, wenn technische Entwicklungen oder aussergewöhnliche Verhältnisse, die in dieser Norm nicht erfasst sind, dies rechtfertigen. Abweichungen müssen durch Theorie oder Versuche ausreichend begründet sein.

1 VERSTÄNDIGUNG

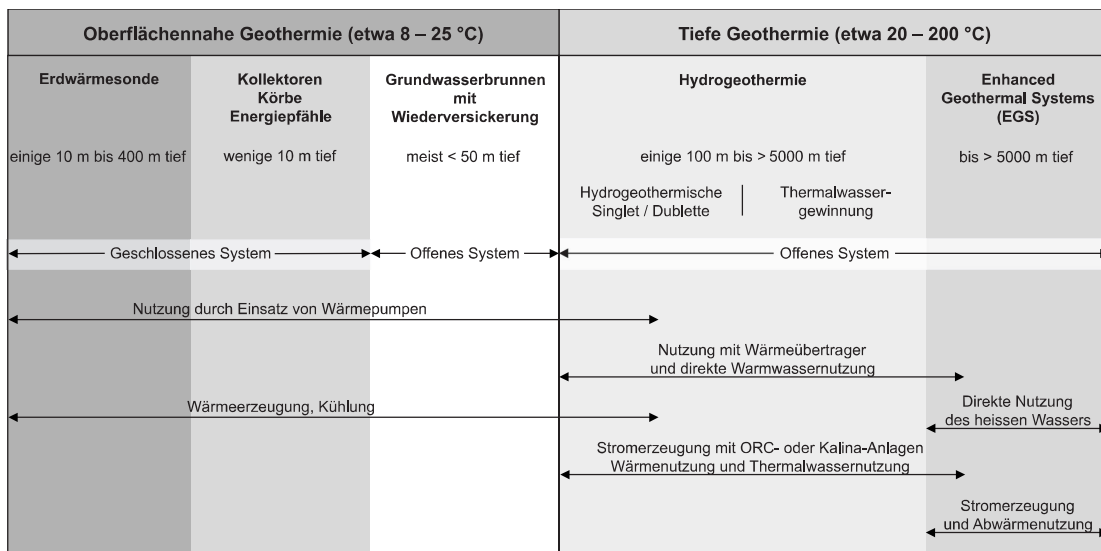
1.1 Allgemeines

1.1.1 Für die geothermische Energienutzung steht eine breite Palette von Technologien zur Verfügung. Deren Einsetzbarkeit richtet sich vor allem nach dem Temperaturniveau der Wärmequelle im Untergrund. Da die Temperatur mit der Tiefe generell zunimmt, erfolgt die Unterteilung der Nutzungsbereiche in untiefe (oberflächennahe) Geothermie und tiefe Geothermie.

1.1.2 Die Tiefenabgrenzung wird generell bei 400 m unter Terrain angenommen. Diese Abgrenzung wurde 1987 durch das Bundesamt für Energiewirtschaft bei der Einführung der Risikodeckung des Bundes für Geothermie-Bohrungen vorgenommen; inzwischen hat sich dies – zumindest in Europa – so eingebürgert [1].

1.1.3 Die Figur 1 veranschaulicht die Tiefenbereiche der verschiedenen Nutzungstechnologien und die darin vorherrschenden Temperaturbereiche. Die Figur zeigt, wo Erdwärmesonden in den technischen und geologisch-hydrogeologischen Rahmenbedingungen einzuordnen sind.

Figur 1 Übersicht Erdwärmennutzung, nach [2]



1.2 Definitionen

1.2.1 Erdwärmennutzung

1.2.1.1 Erdwärme
Géothermie

Im Gestein des Untergrundes gespeicherte thermische Energie. Es handelt sich um die (aktiv) gespeicherte Energie sowie die (natürlicherweise) enthaltene Energie.

1.2.1.2 Wärmequelle
Source de chaleur

In der Geothermie wird unter Wärmequelle jedes System zur Nutzung der im Untergrund gespeicherten thermischen Energie verstanden (z.B. EWS).

1.2.1.3 Wärmeträger
Agent caloporteur

Medium, welches im Erdwärmesondenkreislauf Wärme transportiert, üblicherweise ein Frostschutzgemisch oder Wasser.

1.2.1.4 Erdwärmesonde (EWS)
Sonde géothermique (SG)

Koaxialrohr, U-Rohr (Simplex-EWS) oder Doppel-U-Rohr (Duplex-EWS), das, hinterfüllt mit einem im Bohrloch verbleibenden Injektionsrohr, in eine bis ca. 400 m tiefe Bohrung eingeführt wird. Die Sondenrohre sind mit einem Wärmeträger gefüllt, der im geschlossenen Kreislauf der Sonde zirkuliert und so Energie mit dem Erdreich zum Heizen oder Kühlen austauscht.

1.2.1.5	Erdwärmesondenfeld <i>Champ de sondes géothermiques</i>	Erdwärmesonden-Anlage mit mehreren gleichzeitig genutzten EWS.
1.2.1.6	Geocooling <i>Geocooling</i>	Kühlung durch direkte Abgabe der Gebäudewärme (d.h. ohne die Wärmepumpe im Umkehrmodus) über einen Wärmeübertrager in die Erdwärmesonde. Wird auch Freie Kühlung genannt.
1.2.1.7	Frostgrenze <i>Limite de gel</i>	Die Tiefe unter der Erdoberfläche, unter der es nicht mehr zu natürlicher Eisbildung kommt.
1.2.2	Erdwärmesonden-Anlage	
1.2.2.1	Erdwärmesondenrohr <i>Tuyau de sonde géothermique</i>	Koaxialrohr, U-Rohr oder Doppel-U-Rohr.
1.2.2.2	Erdwärmesondenfuss <i>Pied de sonde géothermique</i>	Unteres Endstück einer EWS. Bei U-Rohr-Erdwärmesonden entspricht der Fuss einer 180°-Umlenkung.
1.2.2.3	Erdwärmesondenkreis <i>Circuit de sonde géothermique</i>	Besteht aus der Erdwärmesonde und deren Anbindung an die Wärmepumpe bzw. den Wärmeübertrager; darin zirkuliert der Wärmeträger. Wird auch als Solekreislauf bezeichnet.
1.2.2.4	Umwälzpumpe <i>Circulateur</i>	Pumpe zur Aufrechterhaltung der Wärmeträgerzirkulation.
1.2.2.5	Expansionsgefäss <i>Vase d'expansion</i>	Gefäss zum Ausgleich von Volumenänderungen im Kreislauf.
1.2.2.6	Fülldruck <i>Pression de remplissage</i>	Druck im Erdwärmesondenkreis.
1.2.2.7	Gesamtsystem <i>Système énergétique complet</i>	Erdwärmesondenkreislauf sowie die Wärmepumpe und Heizverteilung einschliesslich aller Komponenten im hydraulischen Kreislauf.
1.2.2.8	Tichelmann-System <i>Système Tichelmann</i>	Rohrführungsart, bei der die Summe der Längen von Vorlaufleitung und Rücklaufleitung bei jedem Anschluss etwa gleich ist.
1.2.2.9	Normlänge der Erdwärmesonde <i>Longueur nominale de sonde géothermique</i> $L_{BHE,N}$ m	Länge (Tiefe) der Erdwärmesonde bei Normbedingungen (siehe D.3.2).
1.2.2.10	Bohrlochwiderstand <i>Résistance thermique de la sonde</i> R_b K·m/W	Thermischer Widerstand, den die Erdwärmesonde inklusive Hinterfüllung dem Energieaustausch mit dem Erdreich entgegensezt.
1.2.3	Geologie	
1.2.3.1	Geologische Struktur <i>Structure géologique</i>	Schichtungs- oder deformationsbedingte Struktur des Untergrundes.
1.2.3.2	Lithologie <i>Lithologie</i>	Beschreibung der Gesteinsschichten. Vielfach wird darunter auch der vertikale Aufbau der Gesteinsschichten in einem geologischen Bohrprofil verstanden.
1.2.3.3	Grundwasservorkommen <i>Eau souterraine</i>	In den Poren oder Klüften des Untergrundes gespeichertes oder zirkulierendes Wasser.
1.2.3.4	Arteser <i>Eau artésienne</i>	Selbständig austretendes Wasser aus einem Bohrloch, weil die Grundwasser-Druckhöhe über der Geländeoberfläche liegt.

1.2.3.5	Geologisches Bohrprofil <i>Profil de forage</i>	Beschreibung der angetroffenen geologischen Verhältnisse (Gesteinsbeschreibungen, Zuordnung zu geologischen Einheiten). Grundlagen dafür sind die vom Bohrmeister entnommenen Proben, das Bohrprotokoll und weitere geologische Grundlagen wie Karten und Publikationen (Muster siehe A.3).
1.2.3.6	Geologische, anthropogene Gefahren <i>Dangers géologiques anthropogènes</i>	Künstliche Risiken für Bauten im Erdreich, z.B. belasteter Standort, Werkleitungen, Tunnel.
1.2.3.7	Geologische, geogene Gefahren <i>Dangers géologiques géogènes</i>	Natürliche Risiken für Bauten im Erdreich, z.B. artesisch gespanntes Grundwasser, Gasvorkommen, grundbruchgefährdete Schichten, instabile Schichten, stark zerklüftetes Gebirge, Geröll, Sedimente mit einzelnen Findlingen, Bergsturz- oder Rutschgebiete.
1.2.3.8	Wärmeleitfähigkeit <i>Conductivité thermique</i> λ W/(m·K)	Wärmestrom bei einem Temperaturgefälle von einem Kelvin pro Meter unter stationären Verhältnissen in einem homogenen Stoff.
1.2.3.9	Spezifische Wärmekapazität <i>Capacité thermique spécifique</i> C, ρ_c J/(kg·K), J/(m ³ ·K)	Wärmeenergiemenge, welche notwendig ist, um die Temperatur von 1 kg Masse (bzw. 1 m ³) eines Stoffes um 1 K zu erhöhen.
1.2.4	Bohrung	
1.2.4.1	Bohrprotokoll <i>Protocole de forage</i>	Dokumentation über die Ausführung der Bohrung. Das Bohrprotokoll wird vom Bohrmeister erstellt und enthält technische Angaben zur Ausführung der Bohrung (Ablauf, eingesetztes Material) sowie technische Angaben zum angetroffenen Material und Grundwasser. Es ist bei jeder Bohrung erforderlich (siehe A.1).
1.2.4.2	Bohrklein <i>Déblais de forage</i>	Durch den Bohrprozess zertrümmertes Gestein, das mit der Bohrspülung zur Erdoberfläche gebracht wird.
1.2.4.3	Hinterfüllung <i>Remplissage</i>	Material zum Auffüllen des Hohlraumes zwischen Erdwärmesondenrohren und Bohrlochwand.
1.2.4.4	Packer <i>Packer</i>	Eine in das Bohrloch eingeführte, mechanische oder hydraulische Abdichtung.
1.2.4.5	Thixotropie <i>Thixotropie</i>	Eigenschaft von Flüssigkeiten, im Ruhezustand zähflüssiger zu sein als unter Bewegung.
1.2.5	Energie	
1.2.5.1	Bedarfsprofil <i>Profil des besoins</i> Q_m MJ, kWh	Heiz-/Klimakältebedarf des Gebäudes in Funktion der Zeit (z.B. monatlich).
1.2.5.2	Belastungsprofil <i>Profil de charge</i> Q_m MJ, kWh	Heiz-/Kühlbelastung der Erdwärmesonde in Funktion der Zeit (z.B. monatlich).
1.2.5.3	Jahreswärmebedarf <i>Besoins de chaleur annuels</i> Q_a MJ, kWh	Wärme, die dem System in einem Jahr zugeführt werden muss. Sie setzt sich aus Heizwärmebedarf (SIA 380/1), Warmwasserbedarf usw. zusammen.

1.2.5.4	<p>Jahreswärmebedarf für Warmwasser</p> <p><i>Besoins de chaleur annuels pour l'eau chaude</i></p> <p>Q_{ww} bzw. q_{ww}</p> <p>MJ, kWh bzw. MJ/m², kWh/m²</p>	<p>Wärme, die während eines Jahres notwendig ist, um die benötigte Menge Warmwasser auf die Solltemperatur zu erwärmen, absolut oder bezogen auf die Energiebezugsfläche.</p>
1.2.6	Leistung	
1.2.6.1	<p>Heizleistung</p> <p><i>Puissance thermique</i></p> <p>Φ_c</p> <p>W</p>	<p>A) Kondensatorleistung der Wärmepumpe, Abgabeleistung des Heizgeräts.</p> <p>B) Leistung, die für die Beheizung des Gebäudes notwendig ist.</p>
1.2.6.2	<p>Heizleistung der WP im Auslegepunkt</p> <p><i>Puissance thermique de la PAC au point de dimensionnement</i></p> <p>$\Phi_{HP,c}$</p> <p>W</p>	<p>Leistung der Wärmepumpe im Auslegepunkt. Der Auslegepunkt definiert sich über die Heizungsvorlauf- und die Wärmeträgertemperatur bei der tiefsten Aussentemperatur (SIA 384.201).</p>
1.2.6.3	<p>Norm-Heizlast</p> <p><i>Charge thermique nominale</i></p> <p>Φ_{HL}</p> <p>W</p>	<p>Wärmestrom, der die für das Einhalten der festgelegten Sollbedingungen erforderlich ist.</p>
1.2.6.4	<p>Kälteleistung</p> <p><i>Puissance de refroidissement</i></p> <p>Φ_e</p> <p>W</p>	<p>A) Verdampferleistung der Wärmepumpe.</p> <p>B) Leistung, die für die Gebäudekühlung notwendig ist.</p>
1.2.6.5	<p>Spezifische Entzugsleistung</p> <p><i>Puissance prélevée spécifique</i></p> <p>P_{BHE}</p> <p>W/m</p>	<p>Leistung, die dem Boden pro Meter Sondenlänge entzogen wird. Sie ist abhängig von den physikalischen Eigenschaften des Untergrundes. Sie ergibt sich aus dem Produkt des Massenstromes, der Differenz aus Vor- und Rücklauftemperatur und der spezifischen Wärmekapazität des Wärmeträgers.</p>
1.2.6.6	<p>Spezifische hydraulische Leistung</p> <p><i>Puissance hydraulique spécifique</i></p> <p>$P_{hy,sp}$</p> <p>W/m</p>	<p>Spezifische Leistung für das Transportieren einer Flüssigkeit durch eine Leitung pro Meter Sondenlänge.</p>
1.2.7	Betriebszeit	
1.2.7.1	<p>Jahresbetriebszeit</p> <p><i>Durée de fonctionnement annuelle</i></p> <p>t_a</p> <p>h</p>	<p>Laufzeit der Anlagekomponenten pro Jahr.</p>
1.2.7.2	<p>Jahresbetriebszeit Heizung</p> <p><i>Durée de fonctionnement annuelle du chauffage</i></p> <p>$t_{a,H}$</p> <p>h</p>	<p>Betriebsstunden der Heizung pro Jahr (Volllastzeit).</p>
1.2.7.3	<p>Jahresbetriebszeit Wärmepumpe für Gesamtsystem</p> <p><i>Durée de fonctionnement annuelle de la pompe à chaleur pour le système énergétique complet</i></p> <p>$t_{a,HP,tot}$</p> <p>h</p>	<p>Betriebsstunden der Wärmepumpe pro Jahr. Darin sind alle Betriebsstunden enthalten, die für die Deckung des Heizwärme-, Warmwasser- und Zusatzwärmebedarfs pro Jahr notwendig sind.</p>

1.2.7.4	Norm-Jahresbetriebszeit <i>Durée de fonctionnement annuelle nominale</i> $t_{a,N}$ h	Volllastzeit bei einem Wärmeerzeuger, der der Leistung der Norm-Heizlast entspricht.
1.2.7.5	Jährliche Volllastzeit <i>Durée annuelle à pleine charge</i> t_a h	Fiktive jährliche Betriebszeit des Wärmeerzeugers (auf der höchsten Leistungsstufe), mit welcher die gesamte Nutzenergie und die gesamte Verlustenergie gedeckt werden können.
1.2.8	Temperatur	
1.2.8.1	Mittlere Jahresausenlufttemperatur <i>Température extérieure annuelle moyenne</i> $\theta_{e,a,m}$ °C	Durchschnitt der Aussenlufttemperatur über ein Jahr.
1.2.8.2	Bodenoberflächentemperatur <i>Température superficielle du sol</i> $\theta_{G,s}$ °C	Temperatur an der Erdoberfläche.
1.2.8.3	Bodentemperatur <i>Température du sol</i> θ_G °C	Temperatur im Untergrund.
1.2.8.4	Temperaturgradient <i>Gradient de température</i> $\nabla\theta_G$ K/m	Temperaturänderung pro Meter.
1.2.8.5	Bodentemperaturdifferenz <i>Différence de température du sol</i> $\Delta\theta_G$ K	Temperaturdifferenz zwischen der mittleren Bodentemperatur entlang der EWS und der mittleren Wärmeträgertemperatur beim Auslegepunkt.
1.2.8.6	Auslegetemperatur EWS <i>Température de dimensionnement SG</i> $\theta_{BHE,50}$ °C	Tiefste Betriebstemperatur der Erdwärmesonde im Heizbetrieb bzw. höchste Betriebstemperatur im Kühlbetrieb während 50 Betriebsjahren.
1.2.8.7	Erdwärmesondentemperatur <i>Température de sonde géothermique</i> θ_{BHE} °C	Mittelwert zwischen der EWS-Eintritts- und -Austrittstemperatur.
1.2.8.8	Warmwassertemperatur <i>Température d'eau chaude</i> θ_{ww} °C	Bei der Trinkwarmwassererwärmung geforderte Temperatur.
1.2.8.9	Kaltwassertemperatur <i>Température d'eau froide</i> θ_w °C	Temperatur des Leitungswassers.

1.3 Bezeichnungen, Begriffe und Einheiten

Bezeichnung	Begriff	Einheit
c, ρ_c	spezifische Wärmekapazität	J/(kg·K), J/(m ³ ·K)
c_w	spezifische Wärmekapazität von Wasser	J/(kg·K)
H_S	Höhe des Standorts über Meer	m ü.M.
L_{BHE}	Länge der Erdwärmesonde	m
$L_{BHE,N}$	Normlänge der Erdwärmesonde	m
P_{el}	Pumpenleistung	W
P_{BHE}	spezifische Entzugsleistung der EWS	W/m
$P_{hy,sp}$	spezifische hydraulische Leistung	W/m
p_m	maximaler Druck	bar
p_p	Vordruck	bar
Q_a	Jahreswärmebedarf	kWh, MJ
Q_C	Klimakältebedarf	KWh/m ² , MJ/m ²
Q_e	jährlicher Zusatzwärmebedarf	kWh, MJ
Q_H	Heizwärmebedarf	kWh, MJ
Q_m	Bedarfsprofil, Belastungsprofil	kWh, MJ
Q_{ww}	Jahreswärmebedarf Warmwasser	kWh, MJ
q_{ww}	Jahreswärmebedarf Warmwasser pro m ² EBF	KWh/m ² , MJ/m ²
$Q_{ww,d}$	Warmwasserbedarf pro Tag	kg, l
R_b	Bohrlochwiderstand	K·m/W
s	Sicherheitsfaktor	–
t_a	Jahresbetriebszeit	h
$t_{a,H}$	Jahresbetriebszeit Heizung	h
$t_{a,N}$	Norm-Jahresbetriebszeit	h
$t_{a,HP,tot}$	Jahresbetriebszeit WP für Gesamtsystem	h
V_{BHE}	Inhalt der Erdwärmesonden und des Erdwärmesondenkreises	l
$V_{exp,min}$	minimales Volumen des Expansionsgefässes	l
γ_{exp}	Ausdehnungsfaktor des Volumens (0 °C bis 20 °C)	–
$\Delta\theta_G$	Bodentemperaturdifferenz	K
η_{exp}	Nutzungsgrad des Expansionsgefässes	–
η_{PU}	Wirkungsgrad der Umwälzpumpe	–
θ_{BHE}	Erdwärmesondentemperatur	°C
$\theta_{BHE,50}$	Auslegetemperatur der EWS	°C
$\theta_{e,a,m}$	mittlere Jahresausenlufttemperatur	°C
θ_G	Bodentemperatur	°C
$\theta_{G,s}$	Bodenoberflächentemperatur	°C
$\theta_{G,s,H}$	Bodenoberflächentemperatur Heizfall	°C
$\theta_{G,s,C}$	Bodenoberflächentemperatur Kühlfall	°C
θ_w	Kaltwassertemperatur	°C
θ_{ww}	Warmwassertemperatur	°C
Φ_{BHE}	Entzugsleistung der EWS	W
Φ_c	Heizleistung der Wärmepumpe/Kondensatorleistung	W
Φ_e	Verdampferleistung, Kälteleistung	W
Φ_{HL}	Norm-Heizlast	W
$\Phi_{HP,c}$	Heizleistung der WP im Auslegepunkt	W
$\nabla\theta_G$	Temperaturgradient	K/m

1.4 Indizes

Index	deutsch	englisch	französisch
<i>a</i>	jahresbezogen	annual	annuel
<i>b</i>	Bohrloch	borehole	forage
<i>BHE</i>	Erdwärmesonde	borehole heat exchanger	sonde géothermique
<i>C</i>	Kühlung	cooling	refroidissement
<i>c</i>	Kondensator	condenser	condensateur
<i>D</i>	Taupunkt	dew point	point de rosée
<i>d</i>	pro Tag	daily	par jour
<i>e</i>	zusätzlich	extra	complémentaire, supplémentaire
<i>e</i>	spezifisch	specific	spécifique
<i>e</i>	Verdampfung	evaporation	évaporation
<i>el</i>	elektrisch	electrical	électrique
<i>exp</i>	Expansionsgefäß	expansion vessel	vase d'expansion
<i>G</i>	Erdreich	ground	terrain
<i>H</i>	Heizung	heating	chauffage
<i>h</i>	Betriebszeit	hours of operation	durée d'exploitation
<i>HL</i>	Heizlast	heating load	charge thermique
<i>HP</i>	Wärmepumpe	heat pump	pompe à chaleur
<i>hww</i>	Heizung und Warmwasser	heating and hot water	chauffage et eau chaude
<i>hy</i>	hydraulisch	hydraulic	hydraulique
<i>i, j, k</i>	Hilfsindizes	indices	indices auxiliaires
<i>m</i>	maximal	maximum	maximum
<i>m</i>	monatlich	monthly	mensuel
<i>m</i>	mittel	mean, medium	moyen
<i>min</i>	minimal	minimal	minimum
<i>N</i>	Norm	standard	norme, nominal
<i>P</i>	Druck	pressure	pression
<i>p</i>	Vordruck	primary pressure	pression d'entrée
<i>PU</i>	Pumpe	pump	pompe
<i>S</i>	Standort	site	site
<i>s</i>	Oberfläche	surface	surface, aire
<i>sp</i>	spezifisch	specific	spécifique
<i>tot</i>	total	total	total
<i>w</i>	Wasser	water	eau
<i>ww</i>	Warmwasser	domestic hot water	eau chaude sanitaire
Δ	Differenz	difference	différence

2 PROJEKTIERUNG

2.1 Allgemeines

- 2.1.1 Bei der Projektierung einer Erdwärmesonden-Anlage ist immer das Gesamtsystem in die Planung einzubeziehen.
- 2.1.2 Die Einsatztemperaturen und Richtwerte für Wärmepumpen gelten gemäss SIA 384/1.

2.2 Nutzungsarten

2.2.1 Allgemein

- 2.2.1.1 Erdwärmesondensysteme eignen sich sowohl für Heiz- als auch für Kühlzwecke. Im ersten Fall wird dem Untergrund Wärme entzogen (Wärmeentzug), im zweiten Fall wird Wärme in den Untergrund eingebracht (Wärmeeintrag).
- 2.2.1.2 Erdwärmesonden mit Wärmeentzug ermöglichen Nutzungen wie Raumheizung, Trinkwassererwärmung, Lüftung (Vorwärmung) und Sonderanwendungen (Schwimmbad, Aussenflächenheizung, Industrieprozesse).
- 2.2.1.3 Erdwärmesonden mit Wärmeeintrag ermöglichen Nutzungen wie Abgabe von Wärme oder Abwärme aus Raumkühlung, Lüftung, Solaranlagen, Industrieprozessen oder Luftentfeuchtung.
- 2.2.1.4 Werden der Wärmeentzug und der Wärmeeintrag kombiniert, funktioniert das Erdwärmesondensystem als Speicher.
- 2.2.1.5 Grundlage für die Dimensionierung von Erdwärmesonden ist ein Bedarfsprofil des Gebäudes (siehe Kapitel 3).
- 2.2.1.6 Die Tiefe, die Anzahl und der Abstand der Erdwärmesonden müssen so dimensioniert werden, dass die erforderlichen Leistungen und Energiemengen für Heizen und Kühlen über die gesamte Nutzungsdauer der Erdwärmesonden-Anlage bereitgestellt werden können. Dies kann mehrere Wärmepumpengenerationen umfassen (Tabelle 3).

2.2.2 Leistung

Der Heizleistungsbedarf bzw. der Kühlleistungsbedarf wird mit SIA 384.201 bzw. SIA V382/2 berechnet.

2.2.3 Bedarfsprofil

- 2.2.3.1 Der Heizwärmebedarf wird mit SIA 380/1 berechnet. Für die Nutzungsdaten gilt SIA 2024.
- 2.2.3.2 Bei einfachen Erdwärmesonden-Anlagen ohne Klimakältebedarf wird ein Bedarfsprofil für das Gebäude aus dem Heizwärmebedarf und dem Bedarf für die Warmwasseranlage abgeleitet. Das Vorgehen wird in 3.2.3 beschrieben.
- 2.2.3.3 Bei komplexen Erdwärmesonden-Anlagen ist für jede Nutzungsart (Heizen und Kühlen) ein eigenes Bedarfsprofil zu erstellen. Das Vorgehen wird in 3.2.4 beschrieben.

2.3 Standort

2.3.1 Klima

Das Klima übt als standortabhängiger Faktor einen entscheidenden Einfluss auf die Entzugs- und Eintragsleistung von Erdwärmesonden aus. Bei der Dimensionierung von Erdwärmesonden-Anla-

gen sind die Daten einer in derselben Klimaregion gelegenen Klimastation mit ähnlicher Höhenlage und topographischer Lage zu verwenden.

2.3.2 Geophysikalische Parameter

2.3.2.1 Mit der Geologie variieren auch die physikalischen Gesteinseigenschaften und damit die spezifische Entzugsleistung an einem bestimmten Standort. Hieraus resultieren für eine definierte Entzugsleistung unterschiedliche Bohrtiefen für Erdwärmesonden. Für die Projektierung einer Erdwärmesonden-Anlage sind daher Kenntnisse über die zu erwartende Geologie des Standortes erforderlich.

2.3.2.2 Die primär bestimmenden geophysikalischen Parameter sind Wärmeleitfähigkeit und Bodentemperatur. Die sekundären Parameter sind Wärmekapazität und Gesteinsdichte.

2.3.2.3 Je nach Grösse eines Projektes (d.h. Anzahl der Erdwärmesonden) können dem Gesamtbudget entsprechend unterschiedlich aufwendige Verfahren zur Bestimmung der Parameter eingesetzt werden. Für die Dimensionierung der Erdwärmesonden werden die am Standort gemessenen oder geschätzten thermischen Gesteinseigenschaften mit einer Toleranzgrenze gemäss Tabelle 1 versehen. Zusätzliche Angaben zu den geophysikalischen Parametern sind in Anhang C enthalten.

Tabelle 1 Toleranzgrenze für die Dimensionierung der Erdwärmesonden

Quelle	Toleranz für die Berechnung Wärmeleitfähigkeit	Toleranz für die Berechnung Bodenoberflächentemperatur
Geologische Karten	Schätzungen aus der Literatur (siehe C.3), abzüglich 25%	Höhenlage, gemäss den Figuren 5 und 6; Toleranz für Heizen subtrahieren, zum Kühlen addieren
Geologie-Datenbank SwEWS [7], Stoffwerte Molassebecken Schweiz	Gewichteter Mittelwert, abzüglich 50% der gewichteten Toleranz, vorbehältlich komplexer geologischer Verhältnisse	Bodenoberflächentemperatur gemäss C.2.2, -1 K zum Heizen bzw. +1 K zum Kühlen
Geologische Bohrprofildaten aus nahe gelegenen Bohrungen (lithologische Bohrprofil-Aufnahme)	Gewichtete Schätzung aus der Literatur, abzüglich 20%, vorbehältlich komplexer geologischer Verhältnisse	Je nach angewandtem Verfahren
Geologische Bohrprofildaten des effektiven Standorts (lithologische Bohrprofil-Aufnahme)	Gewichtete Schätzung aus der Literatur, abzüglich 15%	Je nach angewandtem Verfahren
Labormessungen von Wärmeleitfähigkeit an Bohrklein bzw. Bohrkernen des effektiven Standortes	Gewichtete Berechnung abzüglich 10% für den ausgemessenen Bereich, Restbereich abzüglich 15%	Je nach angewandtem Verfahren
Temperaturprofilaufnahme		Genauigkeit des verwendeten Messfühlers
Geothermischer Response Test (TRT)	Mindestlaufdauer 60 Stunden, bei leistungsgeregeltem Test - 5%, bei Standardtest ungeregelt -10%	Durchschnittstemperatur berechnet mit Wärmeleitfähigkeit und örtlichem Wärmefluss $\pm 0,5$ K
Erweiterter geothermischer Response Test (E-TRT)	Kombination einer dynamischen Temperaturprofilaufnahme (relative Auflösung $< 0,01$ K) mit einem leistungsgeregelten TRT und einer 3-D-Berechnung des Wärmeleitfähigkeitsprofils; gewichteter Wert ohne Toleranzabzug	Toleranz des angewandten Messverfahrens

2.3.3 **Platzierung der Erdwärmesonden**

- 2.3.3.1 Die Bohrstandorte für die Erdwärmesonden hängen von den örtlichen Verhältnissen und allfälligen behördlichen Auflagen ab. Im Speziellen sind die Baulinien und Grenzabstände, unterirdischen Leitungen und Bauten sowie die zulässigen maximalen Bodenbelastungen durch die Gerätschaften abzuklären.
- 2.3.3.2 Bei einer örtlichen Häufung von verschiedenen Projekten ist die gegenseitige Beeinflussung einzurechnen oder durch geeignete Massnahmen (saisonale Nachladung) zu eliminieren.
- 2.3.3.3 Die Bohrungen sind prinzipiell senkrecht auszuführen. Für Schrägbohrungen sind die allenfalls nötigen zusätzlichen Bewilligungen einzuholen (Nachbargrundstücke, Gemeinde, Kanton).
- 2.3.3.4 Aus bohrtechnischen Gründen ist bei vertikalen Bohrungen zwischen einzelnen Erdwärmesonden ein minimaler Abstand von 5 m einzuhalten.
- 2.3.3.5 Erdwärmesonden beeinflussen sich gegenseitig. Bei Anlagen, die vorwiegend nur zum Heizen oder Kühlen verwendet werden, ist der Sondenabstand zu maximieren. Bei Projekten mit einer ausgeglichenen Sommer-Winter-Bilanz, d.h. bei einem Erdwärmesondenspeicher, sind kleine Abstände (> 5 m) sinnvoll. Der Einfluss des Erdwärmesondenabstandes auf die Berechnung ist in 3.2.2 und D.3.6 erläutert.

3 BERECHNUNG UND AUSLEGUNG

3.1 Anforderungen an die Auslegung von Erdwärmesonden

- 3.1.1 Massgebend für die Auslegung ist die gemittelte Wärmeträgertemperatur beim Ein- und Austritt der Erdwärmesonde.
- 3.1.2 Für den Wärmeentzug gilt eine mittlere minimale Wärmeträgertemperatur von $-1,5^{\circ}\text{C}$ (z.B. Eintritt in die Erdwärmesonde -3°C , Austritt 0°C), die während des Betriebs nicht unterschritten werden darf. Die Berechnung erfolgt nach 3.2.4.2 auf 50 Jahre (siehe auch 4.1).
- 3.1.3 Der Wärmeträger muss für die gewählten Temperaturen geeignet sein (siehe 4.5).
- 3.1.4 Bei laminarer Strömung ist durch den schlechteren Wärmeübergang eine um ca. 1,5 K tiefere Erdwärmesondentemperatur zu berücksichtigen als im vergleichbaren, turbulenten Fall mit gleichem Rohrquerschnitt.
- 3.1.5 Für den Wärmeeintrag gilt eine maximale Wärmeträgertemperatur in Abhängigkeit des eingesetzten Sonden- und Hinterfüllungsmaterials. Eine Nutzungsdauer von mindestens 50 Jahren muss für den Jahresverlauf der Erdwärmesondentemperatur gewährleistet sein. Die Ziffern 3.4.2 und 4.1 sowie die BAFU-Vollzugshilfe (siehe 0.2.3) sind zu berücksichtigen.

3.2 Berechnung der Erdwärmesonden

3.2.1 Allgemein

- 3.2.1.1 Einer Erdwärmesonde oder einem Erdwärmesondenfeld kann nicht direkt eine Leistung zugeordnet werden. Die Momentanleistung ist abhängig vom Bohrlochwiderstand, der eine Funktion der Bohrlochgeometrie ist, und der Temperatur um das Bohrloch. Diese Temperatur ist eine Funktion der bereits umgesetzten Energie, der Zeit, der Wärmeleitfähigkeit und -kapazität und eventuellen Grundwasserströmungen. Aufgrund dieser Komplexität werden Erdwärmesonden vorwiegend mit numerischen Modellen berechnet.
- 3.2.1.2 Für die Dimensionierung der Erdwärmesonden sind generell folgende Grundlagen notwendig:
- Bedarfsprofil des Gebäudes und des daraus resultierenden Belastungsprofils,
 - Temperaturlimiten der Erdwärmesonden aufgrund des gewählten Systemkonzepts (siehe 2.2 und 3.1.2),
 - geophysikalische Bedingungen am Standort (siehe 2.3.2),
 - Platzangebot (siehe 2.3.3).

3.2.2 Parameter

Die für einen bestimmten Energiebedarf erforderliche Anzahl, die Tiefe und der Abstand von Erdwärmesonden werden durch eine Vielzahl von Parametern bestimmt. Dabei ist zu beachten, dass verschiedene Faktoren gegenläufige Auswirkungen haben können (siehe Tabelle 2). Die Berechnung der wichtigsten Faktoren ist in D.3 aufgelistet.

Tabelle 2 Einflussfaktoren auf die Dimensionierung der Erdwärmesonden

Parameter	Einfluss auf die Dimensionierung bei grösserem Wert des Parameters	Gewichtung
Energiebedarf	mehr Erdwärmesonden	gross
Entzugsleistung	mehr Erdwärmesonden	gross
Betriebszeit	mehr Erdwärmesonden	mittel
Differenz der Energiemengen zwischen Entzug und Einspeisung	mehr Erdwärmesonden	gross
Wärmeleitfähigkeit des Untergrundes	weniger Erdwärmesonden	gross
Temperatur des Untergrundes	weniger Erdwärmesonden bei Entzug; mehr Erdwärmesonden bei Einspeisen (Kühlen)	gross
Differenz zwischen Boden- und Wärmeträgertemperatur	weniger Erdwärmesonden	gross
Wärmekapazität und Dichte des Untergrundes	weniger Erdwärmesonden	klein
Bohrdurchmesser	weniger Erdwärmesonden	klein
Durchmesser der Erdwärmesonden	weniger Erdwärmesonden	klein
Wärmeleitfähigkeit der Hinterfüllung	weniger Erdwärmesonden	mittel
Tiefere Erdwärmesonden	weniger Erdwärmesonden bei Entzug; mehr Erdwärmesonden bei Einspeisen (Kühlen)	mittel
Abstand der Erdwärmesonden	weniger Erdwärmesonden	mittel
Besserer Wärmeübergang des Wärmeträgers	weniger Erdwärmesonden	mittel

3.2.3 Vorgehen bei einfachen Erdwärmesonden-Anlagen

3.2.3.1 Einfache Anlagen sind Anlagen zur Wärmeerzeugung (Raumheizung, Trinkwassererwärmung) mit normalem Bedarfsprofil und mit maximal 4 Erdwärmesonden und Geocooling im Wohnungsbau. Dazu können vereinfachte Berechnungsverfahren für die Wärmeerzeugung angewendet werden. Geocooling hat auf die Wärmeerzeugung einen positiven Einfluss und muss für Kleinanlagen nicht berücksichtigt werden.

3.2.3.2 Bei der vereinfachten Dimensionierung wird das Bedarfsprofil mit dem Heizleistungsbedarf des Gebäudes nach SIA 384.201 sowie dem Jahreswärmebedarf der Warmwasseranlage nach SIA 2024 erstellt. Diesem Energiebedarf entsprechend wird eine geeignete Wärmepumpe mit ausreichender Leistung bestimmt und ihre Laufzeit definiert. Sperrzeiten für die elektrische Energiezufuhr müssen berücksichtigt werden. Die standortabhängige Leistung der Erdwärmesonde wird durch die Höhenlage, die lokale Bodentemperatur sowie die lokale geologische Struktur bzw. die thermischen Gesteinseigenschaften bestimmt (Tabelle 2).

3.2.3.3 Die Bodenkennwerte sind in C.3 beschrieben.

3.2.3.4 Ein mögliches Verfahren ist in D.3 beschrieben. Mit den Diagrammen aus D.3 und unter Verwendung der oben beschriebenen Daten können Anzahl, Abstand und Länge der Erdwärmesonden bestimmt werden.

3.2.4 **Vorgehen bei komplexen Erdwärmesonden-Anlagen**

- 3.2.4.1 Komplexe Anlagen sind Anlagen mit mehr als 4 Erdwärmesonden, mit spezifischen Anforderungen an die Kühlung, bei Einbringen von Abwärme in die Erdwärmesonden oder mit einem speziellen Bedarfsprofil.
- 3.2.4.2 Bei komplexen Erdwärmesonden-Anlagen muss eine detaillierte Dimensionierung mit den am Standort vorhandenen gültigen Randbedingungen durchgeführt werden (siehe 2.3). Dabei ist die effektive Belastung über die Zeit zu berücksichtigen. Nicht zulässig sind Berechnungen, basierend auf Durchschnittsbelastungen mit einer zeitlichen Auflösung grösser 3 Stunden, ausser wenn die Spitzenbelastung zeitlich entsprechend berücksichtigt wird.
- 3.2.4.3 Eine Auswahl von möglichen Verfahren ist in G.3 aufgeführt.

3.3 **Auslegung und Hydraulikberechnung des Erdwärmesondenkreislaufs**

3.3.1 **Allgemein**

Im Erdwärmesondenkreislauf zirkuliert ein Wärmeträger (siehe 4.5). Diese Flüssigkeit übernimmt den Energietransfer zwischen der Erdwärmesonde und dem Energienutzer. Der Wärmeträger hat einen Einfluss auf den Wärmeübergang zum Erdwärmesondenrohr und damit auf die Wärmeträgertemperatur bzw. die Leistung einer Erdwärmesonde.

3.3.2 **Aufbau des Erdwärmesondenkreislaufs**

- 3.3.2.1 Um die Funktion der Erdwärmesonden-Anlage langfristig gewährleisten zu können, muss der Erdwärmesondenkreislauf aus Sicherheitsgründen und zur Erleichterung von Servicearbeiten Absperrorgane, eine separate Füll- und Spüleinrichtung, Entlüftungen, ein Überdruckventil, einen Druckwächter, ein Expansionsgefäss und eine Umwälzpumpe aufweisen.
- 3.3.2.2 An jeder Erdwärmesonde müssen Absperrorgane angeschlossen sein, so dass jede Erdwärmesonde des Erdwärmesondenkreislaufs am Vor- und Rücklauf unterbrochen werden kann.
- 3.3.2.3 Jede Erdwärmesonde muss zur Vermeidung von Lufteinschlüssen separat gefüllt und gespült werden können. Verdampfer und Wärmepumpe müssen ebenfalls separat gefüllt werden können.
- 3.3.2.4 Die vollständige Entlüftung des Erdwärmesondenkreislaufs muss sichergestellt werden. Entlüftungsautomaten sollten manuell abgesperrt werden können.
- 3.3.2.5 Zur Überwachung der Anlage muss ein Druckwächter installiert werden; damit kann die Dichtheit des Erdwärmesondenkreislaufs kontinuierlich kontrolliert werden.
- 3.3.2.6 Die Ausdehnung des Wärmeträgers wird mit Hilfe eines Expansionsgefässes kompensiert. Das Volumen des Expansionsgefässes wird mit einem dreifachen Sicherheitszuschlag der berechneten Ausdehnung von 0 °C auf 20 °C bzw. bis zur maximal möglichen Temperatur des Wärmeträgers bemessen (siehe C.4, Tabelle 8).
- 3.3.2.7 Das Rohrsystem im Gebäude ist so auszuführen, dass Kondenswasser über eine Tropfwanne abgeleitet oder durch eine wasserfeste Wärmedämmung unterbunden wird. Der Querschnitt muss genügend gross bemessen werden, damit keine Strömungsgeräusche entstehen. Der Stromverbrauch der Umwälzpumpe im Erdwärmesondenkreislauf sollte weniger als 10% desjenigen der Wärmepumpe betragen. Die Strömungsgeschwindigkeit im Gebäude soll 1,5 m/s nicht überschreiten. Bei den Zuleitungen ab den Erdwärmesonden bis zum Verteiler sollte die Strömungsgeschwindigkeit maximal 1 m/s betragen.
- 3.3.2.8 Bei speziellen Anwendungen sollte ein Frostschutzwächter zur Überwachung der minimalen Wärmeträgertemperatur oder bei Wasser als Wärmeträger ein Strömungswächter zur Kontrolle des Durchflusses eingesetzt werden.

3.3.3 **Anschluss der Erdwärmesonde**

- 3.3.3.1 Die Erdwärmesondenrohre werden sternförmig an einen Verteiler angeschlossen. Bei den üblicherweise eingesetzten Doppel-U-Rohr-Erdwärmesonden können die beiden Kreise auch mit Y-Formstücken zu je einem Vor- und Rücklauf in einer entsprechend grösseren Rohrdimension zusammengefasst werden.
- 3.3.3.2 Bei einer Erdwärmesonde mit Y-Formstücken kann direkt auf die Wärmepumpe gefahren werden.
- 3.3.3.3 Werden Erdwärmesonden in Serie zu einer Einheit zusammengeschlossen, müssen die separaten Kreise von Erdwärmesonde zu Erdwärmesonde einzeln geführt werden, damit ein kontrolliertes Spülen und Entlüften sichergestellt ist.
- 3.3.3.4 Eine Rohrverlegung ohne Absperrorgane für jeden einzelnen Kreis ist nicht zulässig.

3.3.4 **Berechnung des Erdwärmesondenkreislaufs**

- 3.3.4.1 Die Anzahl und die Tiefe der Erdwärmesonden beeinflussen das hydraulische Verhalten des Wärmeträgers im Erdwärmesondenkreis. Die Auslegung des Erdwärmesondenkreises hat einen grossen Einfluss auf die Energieeffizienz und die Investitionskosten.
- 3.3.4.2 Die Strömung in den Erdwärmesondenrohren sollte turbulent sein, damit ein guter Wärmeübergang zwischen Wärmeträger und Sondenmaterial ermöglicht wird.
- 3.3.4.3 Die Hydraulik des Erdwärmesondenkreislaufs wird mit Hilfe eines Berechnungsverfahrens, z.B. nach Colebrook/Nikuradse, berechnet. Darauf basierende Diagramme sind für verschiedene Frostschutzkonzentrationen in D.5 enthalten.
- 3.3.4.4 Der Volumenstrom des Erdwärmesondenkreislaufs wird am Verteiler aufgeteilt. Die Zuleitungen zu den einzelnen Erdwärmesondenrohren sind in der Regel unterschiedlich lang. Dadurch entstehen unterschiedliche Volumenströme in den einzelnen Zuleitungen. Ein unterschiedlicher Durchfluss von bis zu $\pm 15\%$ pro Erdwärmesonde ist zulässig.
- 3.3.4.5 Die Temperaturdifferenz zwischen Ein- und Austritt am Verdampfer der Wärmepumpe soll 3 K bis 4 K betragen.
- 3.3.4.6 Die Umwälzpumpe muss für den verwendeten Wärmeträger und die zu erwartenden Wärmeträgertemperaturen geeignet sein (Taupunktunterschreitungen).

3.4 Grundsätze der Systemoptimierung

3.4.1 Allgemein

Eine Erdwärmesonden-Anlage ist auf Lebenszykluskosten zu optimieren. Dabei ist zu beachten, dass die Nutzungsdauer der Erdwärmesonde um ein Vielfaches grösser ist als die Nutzungsdauer der Wärmepumpe und der übrigen Komponenten.

3.4.2 Parameter für Wirtschaftlichkeitsberechnung

Für die Wirtschaftlichkeitsrechnung sind die Werte gemäss SIA 480 einzusetzen. In Ergänzung dazu sind folgende Werte zu verwenden.

Tabelle 3 Parameter für die Wirtschaftlichkeitsrechnung

	Jährliche Wartungs- und Unterhaltskosten in % des Anlagewertes	Nutzungsdauer Jahre
Erdwärmesonde und Zuleitungen	0	50
Wärmepumpe	1–2	20
Erdwärmesondenkreislauf (Leitungen und Armaturen)	1–2	20

3.4.3 Erneuerung der Wärmepumpe

3.4.3.1 Bei der Planung einer Erdwärmesonden-Anlage ist zu berücksichtigen, dass mehrere Wärmepumpengenerationen nacheinander an der Erdwärmesonde angeschlossen werden.

3.4.3.2 Kommende Wärmepumpengenerationen werden sehr wahrscheinlich eine höhere Effizienz aufweisen. Dies bedeutet, dass bei gleicher Heizleistung eine grössere Kälteleistung erbracht wird und somit die Erdwärmesonde stärker belastet sein wird. Bei der Dimensionierung des Erdwärmesondenkreislaufs sollte daher von zukünftig deutlich besseren Leistungsziffern der Wärmepumpe ausgegangen werden. Auf die Kälteleistung bezogen kann dies ca. 10% betragen. Bei Überlastung muss entweder der Heizbedarf verringert oder die Anzahl der Erdwärmesonden durch Einbau weiterer Sonden erhöht werden. Bei kleineren Objekten können auch Erdregister oder Erdwärmekörbe zur Ergänzung eingesetzt werden.

3.4.4 Nachladung

3.4.4.1 Bei grossen Objekten mit unausgeglichener Energiebilanz (Überschuss an Heiz- oder Kühlbelastung) verschiebt sich die Wärmeträgertemperatur entsprechend der Belastung mit der Zeit. Diese Temperaturdrift kann mit der Zeit den Betrieb der Anlage verunmöglichen.

3.4.4.2 Unterhalb einer minimalen Erdwärmesondentemperatur von -5°C bei mehr als 1000 Stunden Volllastzeit bzw. -3°C bei mehr als 3000 Stunden Volllastzeit ist infolge Eisbildung mit Schäden an den Erdwärmesonden oder den berührenden Bauteilen zu rechnen.

3.4.4.3 Je nach Dimensionierung können die Erdwärmesonden auf die gesamte Nutzungsdauer des Gebäudes ausgelegt werden. Die Dimensionierung muss jedoch die unter 3.2 angegebene minimal zulässige Nutzungstemperatur während 50 Jahren berücksichtigen. Bei unausgeglichener Energiebilanz kann über eine saisonale Nachladung des Untergrundes ein Ausgleich geschaffen werden (z.B. mit Hilfe von Luftwärmeübertragern). Damit kann die thermische Nutzungsdauer der Erdwärmesonden-Anlage bis zur Nutzungsdauer der Erdwärmesonde verlängert werden.

4 ANFORDERUNGEN AN BAUSTOFFE UND KONSTRUKTION

4.1 Erdverlegtes Rohrmaterial

- 4.1.1 Die erdverlegten Rohre und deren Verbindungselemente müssen in dauerhafter und korrosions-sicherer Ausführung eingebaut werden. Üblicherweise kommen hier Kunststoffrohre zum Einsatz. Der erdseitige Anlageteil muss den auftretenden Drücken und Temperaturen standhalten. Es muss mindestens eine Nutzungsdauer von 50 Jahren erreicht werden. Eine Durchfluss- und Dichtheitsprüfung (Kontraktionsverfahren in Anlehnung an SN EN 805) ist für jede Erdwärmesonde nach dem Einbau durchzuführen (siehe B.2). Dabei ist der Maximaldruck, d.h. die Differenz zwischen Innen- und Aussendruck, der sich je nach Tiefe der Erdwärmesonde ergibt, gemäss 5.4.1 einzuhalten.
- 4.1.2 Die Prüfergebnisse sind in einem Prüf- und Abnahmeprotokoll gemäss A.2 zu dokumentieren.
- 4.1.3 Die Erdwärmesonde besteht aus den Erdwärmesondenrohren, dem Erdwärmesondenfuss, dem Injektionsrohr und der Hinterfüllung. Sondenrohre und Sondenfuss sind werkseits zu verschweissen und auf Dichtheit zu prüfen. Das Schweisspersonal muss einen gültigen Schweisserpass (VKR ¹⁾ oder äquivalent) haben. Die Schweissungen müssen nach der Richtlinie DVS 2207-1 erfolgen.
- 4.1.4 Der Hersteller von Erdwärmesondenrohren stellt eine kontinuierliche Prüfung von Wanddicke und Durchmesser während der Produktion sicher. Es dürfen nur Rohre eingebaut werden, die diese Bedingungen vollumfänglich erfüllen.
- 4.1.5 Insbesondere sind die Schweissparameter zu dokumentieren. Es ist sicherzustellen, dass keine fehlerhaften Produkte eingebaut werden.
- 4.1.6 Das QM-System des Herstellers muss nach ISO 9001 zertifiziert sein. Der Produktionsablauf der Erdwärmesondenrohr- und -fusserstellung muss darin beschrieben sein. Eine Fremdüberwachung nach der Richtlinie SKZ HR 3.26, für die gesamte Erdwärmesondenproduktion (Rohr, Fuss, Schweissung), hat durch eine akkreditierte Prüfstelle halbjährlich zu erfolgen.
- 4.1.7 Der Hersteller stellt die lückenlose Rückverfolgbarkeit auf Materialien und Prozessparameter durch ein geeignetes Werkzeugzeugnis nach SN EN 10204, Ziffer 2.1.B, sicher.
- 4.1.8 U-Erdwärmesondenrohre aus Polyethylen müssen die Materialqualität PE 100 in der Druckstufe PN 16 aufweisen. Werden spezielle Erdwärmesondenkonstruktionen eingesetzt, muss die maximale Einbaulänge dem zulässigen Betriebsdruck angepasst werden. Die Konstruktion muss Ziffer 4.2.1.1 erfüllen.

4.2 Verbindungstechnik

4.2.1 Verbindungstechnik im Erdreich

Alle erdverlegten Verbindungen, auch die Anbindung an die Verteilleitungen, sind als korrosions- und frostsichere Verbindungen auszuführen. Die Verbindung zwischen der horizontalen Anbindungsleitung und den Erdwärmesondenrohren wird mit Elektroschweissmuffen durch zertifiziertes Personal mit gültigem Schweisserpass (VKR oder äquivalent) hergestellt. Die Schweissungen müssen nach der Richtlinie DVS 2207-1 erfolgen. Die Richtlinie SKZ HR 3.26 ist einzuhalten. Zulässig sind auch Systeme, bei denen eine unlösbare Verbindung über geschützte Dichtflächen erfolgt. Die Verbindung ist so auszuführen, dass mindestens eine Nutzungsdauer von 50 Jahren erreicht wird.

4.2.2 Verbindungstechnik ausserhalb des Erdreiches

Alle Verbindungen ausserhalb des Erdreiches sind als frost- und korrosionssichere Verbindungen auszuführen. Die eingesetzten Materialien dürfen nicht mit dem Wärmeträgermedium reagieren oder durch Kondenswasser angegriffen werden. Zum Beispiel dürfen bei Glykologemischen keine verzinkten Stahlleitungen eingesetzt werden.

¹⁾ Verband Kunststoff-Rohre und -Rohrleitungsteile.

4.3 Abdichtung

4.3.1 Abdichtung der Bohrung (Hinterfüllung)

4.3.1.1 Die Abdichtung des Bohrloches muss folgende Bedingungen erfüllen:

- vertikale Abdichtung von unterschiedlichen Grundwasser- oder Kluftwasserhorizonten,
- thermische Anbindung der Erdwärmesonde an den Untergrund,
- Einbettung und Schutz der Erdwärmesonde.

4.3.1.2 In besonderen Fällen müssen technische Hilfsmittel angewendet werden, z.B. bei Wasserzufluss, artesisch gespanntem Grundwasser, Gaszutritt, Schotterlagen und Klüften. Übliche Mittel sind speziell angepasste Suspensionsmischungen, Erdwärmesonden-Gewebepacker zum Abtrennen und Abdichten oder andere Methoden, damit die Hinterfüllung nicht wegfliessen und eine dichte Anbindung ans Gebirge gewährleistet ist.

4.3.2 Einführung der Leitungen ins Gebäude

Die Leitungen ab den Erdwärmesonden müssen so ins Gebäude eingeführt werden, dass weder Gase noch Flüssigkeiten eindringen können. Geringfügige Geländesetzungen dürfen nicht zu Beschädigungen an den Leitungen führen.

4.4 Wärmedämmung

4.4.1 Werden die Erdwärmesonden wärmegeklämt, müssen Dämmmaterialien verwendet werden, welche bei den herrschenden chemischen und physikalischen Bedingungen im Untergrund formstabil und beständig sind.

4.4.2 Werden Verbindungsleitungen unter der Bodenplatte verlegt, ist darauf zu achten, dass keine Feuchtigkeit auf der Bodenplatte kondensiert (Perimeter- oder Rohrisolation). Dies ist auch zu empfehlen, wenn die Leitungen nicht unter der Frostgrenze verlegt werden können.

4.4.3 Die Erdwärmesondenkreisleitungen im Gebäude sowie alle Armaturen sind gegen Kondensatbildung zu dämmen oder das Tropfwasser ist abzuleiten.

4.5 Wärmeträger

4.5.1 Als Wärmeträger in Erdwärmesondenrohren kann Wasser oder eine Frostschutzlösung verwendet werden (siehe C.4). Der Wärmeträger muss folgenden Anforderungen genügen:

- keine Eisbildung im Verdampfer (bei Wasser ist dazu eine entsprechend hohe Auslegungstemperatur der Erdwärmesonden notwendig),
- keine Korrosion an den im Erdwärmesondenkreislauf eingesetzten Materialien.

4.5.2 Im Sinne der Energieeffizienz soll Wasser oder eine möglichst tiefe Frostschutzkonzentration (geringe Zähigkeit) eingesetzt werden, um einen besseren Wärmeübergang sowie eine kleinere Pumpenleistung zu erhalten.

4.6 Sicherheitseinrichtung

Der Erdwärmesondenkreislauf ist durch eine selbsttätige Leckageüberwachungseinrichtung (Druckwächter) zu sichern. Im Falle einer Leckage werden die Umwälzpumpe und die Wärmepumpe sofort abgeschaltet. Der Betreiber der Anlage hat regelmässig zu prüfen, ob aus der Anlage kein Wärmeträger austritt.

4.7 Messgrößen für den Betrieb

4.7.1 Allgemein

Bei grossen Anlagen sollte ein Messkonzept implementiert werden, um das thermische Verhalten der Erdwärmesonde über die Zeit beobachten zu können. Dies dient zur Optimierung und Überwachung der Anlage.

4.7.2 Messgrößen

4.7.2.1 Um die Qualität und Leistungsfähigkeit der Anlage über die Zeit beurteilen zu können, sind mindestens folgende jährliche Messgrößen nötig:

- Betriebsstunden,
- minimale Vor- und Rücklauftemperatur der Erdwärmesonde.

Eine zusätzliche Messung des Anlagestromverbrauchs erweitert die Beurteilungsmöglichkeiten.

4.7.2.2 Einige der Messgrößen werden üblicherweise von der Wärmepumpensteuerung oder von einem übergeordneten Leitsystem erfasst. Zusätzliche Messgrößen können über vorgängig eingebaute Messstutzen (z.B. Twinlock) bei Bedarf erfasst werden.

4.7.2.3 Für grössere Anlagen sind detaillierte Messprogramme sinnvoll.

5 AUSFÜHRUNG

5.1 Bohrausrüstung

In Anhang E sind die Anforderungen an die Bohrausrüstungen und Empfehlungen für die erfolgreiche Durchführung der üblichen Bohrarbeiten wie auch für die Störfallintervention enthalten. Für den Gewässerschutz relevante Anforderungen sind in der Vollzugshilfe des BAFU (siehe 0.2.3) enthalten.

5.2 Bohrung

5.2.1 Die Bohrarbeiten sind zu dokumentieren und es ist ein Bohrprotokoll (Muster siehe A.1) zu führen.

5.2.2 Es müssen Bohrgeräte und -verfahren eingesetzt werden, die für den anstehenden Baugrund geeignet sind. Grundsätzlich ist sicherzustellen, dass Bohrgerät und -personal den speziellen Anforderungen gewachsen und für nicht vorhersehbare, geogene Situationen ausgerüstet sind (Anhang E). Für solche Situationen sind Universalbohrgeräte gut geeignet, welche sowohl für das Imlochhammer-Bohrverfahren (Spülmedium Druckluft) als auch für das Rotationsspülverfahren (Spülmedium Wasser, bei Erfordernis mit Spülmittelzusätzen) ausgerüstet sind. Die Bohrequipe muss entsprechend geschult sein. Aussergewöhnliche Vorkommnisse (Arteser, Gas, Öl, starker Grundwasseranfall, grosse Klüfte usw.) sind den Behörden zu melden.

5.2.3 Bei jedem Nachsetzen des Gestänges sind Proben des Bohrkleins zu nehmen und je nach Auflage dauerhaft mit Objekt- und Tiefenangabe zu beschriften und abzupacken. Das Bohrklein ist an der Erdoberfläche vollständig zu fassen, mit Wasser gegen Staubbildung zu binden und in eine Schuttmulde abzuleiten.

5.3 Einbau

5.3.1 Es ist sicherzustellen, dass bei den Einbauarbeiten der üblichen Erdwärmesondenrohre (PN 16) die zulässigen Druckbereiche nicht überschritten werden. Während der Einbauphase (Einbringen der Erdwärmesondenrohre bis Beendigung Hinterfüllung) darf der auf die Erdwärmesondenrohre wirkende Aussendruck maximal 8 bar grösser sein als der Innendruck. Umgekehrt darf der Innendruck maximal 21 bar grösser sein als der Aussendruck. Bei speziellen Erdwärmesondenkonstruktionen sind die Angaben des Herstellers zu beachten. Für den Betrieb dürfen die Differenzdrücke nur so hoch sein, dass eine Nutzungsdauer von mindestens 50 Jahren erreicht wird.

5.3.2 Vor dem Einbau der Erdwärmesondenrohre ist das Rohrmaterial visuell auf Verletzungen der Wandung zu prüfen. Bei PE-100-Material ist eine maximale Verletzungstiefe von 10% der Wanddicke zulässig. Zusätzlich empfiehlt es sich, die Sonde vor dem Einbau abzupressen.

5.3.3 Ab einer Erdwärmesondenlänge von 50 m muss ein Haspel zum Einbau verwendet werden. Für Erdwärmesonden mit einer Länge von über 150 m muss der Haspel mit einer Bremse oder Ähnlichem ausgerüstet sein, um einen kontrollierten Einbau zu gewährleisten. Bei der Verwendung von Gewichtsstangen darf die Sonde mit der Seilwinde gebremst werden. Auf jeden Fall ist darauf zu achten, dass die Rohre nicht verletzt oder deformiert werden.

5.3.4 Während oder nach Abschluss der Einbauarbeiten, aber vor dem Hinterfüllen, sind die Erdwärmesondenrohre mit Wasser zu füllen, zu verschliessen, gut sichtbar zu markieren und gegen Beschädigungen zu sichern. Dabei sind insbesondere 5.3.1 und 5.4.3 zu beachten.

5.4 Hinterfüllung

5.4.1 Der Zweck der Hinterfüllung ist in 4.3.1 beschrieben. Die Hinterfüllung muss nach der Vollzugshilfe des BAFU ausgeführt werden. Technische Details sind in F.3 enthalten.

- 5.4.2 Bei Hinterfüllungen mit höherem spezifischem Gewicht als die Standardhinterfüllung (F.3) ist speziell Ziffer 5.3.1 zu beachten. Durch die schwere Hinterfüllung steigt der Aussendruck auf die Rohre an und sie können gequetscht werden.
- 5.4.3 Während der Hinterfüllung müssen die Erdwärmesondenrohre bereits vollständig mit Wasser gefüllt und oben druckdicht abgeschlossen sein, damit die Rohre nicht zusammengedrückt werden. Bei sehr tiefen Erdwärmesonden muss die Füllung schrittweise erfolgen (siehe 5.3.1).

5.5 Anschluss der Erdwärmesonde

- 5.5.1 Der Anschluss der Erdwärmesonde ist nach 4.1 ff auszuführen. Es ist sicherzustellen, dass jede Erdwärmesonde einzeln absperrbar ist. Der Anschluss ist so auszuführen, dass ein Entlüften jeder Erdwärmesonde möglich ist. Werden kurze Erdwärmesonden in Serie zu einer Einheit zusammengeschaltet, gilt 3.3.3.1. Empfehlungen sind in F.4 enthalten.
- 5.5.2 Die Zuleitungsrohre sind unter der Frosttiefe zu verlegen. Wo dies nicht möglich ist, sind sie mit einer formstabilen und beständigen Isolation zu dämmen.
- 5.5.3 Die Einführung in das Haus ist gas- und wasserdicht auszuführen.
- 5.5.4 Vor dem Einsanden sind die Leitungen und Verbindungen (E-Muffen) abzupressen (siehe 6.2). Falls die Zuleitungen unter der Bodenplatte montiert sind, empfiehlt sich eine Prüfung nach SN EN 805.

5.6 Füllen der Erdwärmesonde

- 5.6.1 Bevor Erdwärmesonden mit dem Wärmeträger gefüllt werden, sind sie mit Wasser zu spülen und vollständig zu entlüften. Die minimale Spüldauer ist so festzusetzen, dass mindestens ein kompletter Umlauf pro Erdwärmesondenkreis (U-Rohr) erfolgt (siehe F.5).
- 5.6.2 Damit Erdwärmesonden mit Y-Formstücken und Verlängerungen vollständig entlüftet werden können, sind sie zuerst von einer Seite her so lange zu spülen, bis die Luft der anderen Seite vollständig entwichen ist. Anschliessend sind die Füllhähne zu schliessen, und die Spülrichtung muss umgekehrt werden, um die andere Seite vollständig zu entlüften.
- 5.6.3 Jede Erdwärmesonde muss einzeln mit einem Wärmeträger gefüllt werden, der über die ganze Füllung eine konstante Mischung aufweist.
- 5.6.4 Die berechnete Menge an Wärmeträger und die effektiv eingefüllte Menge pro Erdwärmesonde sind zusammen mit dem Fabrikat und der Konzentration des Gemisches zu protokollieren.

5.7 Dokumentation auf der Anlage

- 5.7.1 Auf der Anlage sind folgende Daten anzuschlagen und in den Unterlagen zu dokumentieren:
- Baujahr der Anlage,
 - Bohrunternehmen,
 - Anzahl, Tiefe und Art der Erdwärmesonden,
 - Zuleitungslängen und Rohrdimension,
 - Fabrikat und Produktbezeichnung des Wärmeträgers, Art und Konzentration,
 - Inhalt des Erdwärmesondenkreislaufs,
 - Fördermenge und -höhe der Umwälzpumpe,
 - Wärmepumpe mit Heiz- und Kälteleistung im Auslegepunkt.
- 5.7.2 Weiter müssen in den Unterlagen mindestens folgende Angaben dokumentiert sein:
- Bohrprotokoll und geologisches Bohrprofil der Referenzbohrung(en) und, falls vorhanden, geologisches Gutachten,
 - Situationsplan mit eingemessenen Erdwärmesonden und Zuleitungen,
 - Füllprotokoll der Erdwärmesonden (5.6.4),
 - berechnete Auslegeleistung der Erdwärmesonden,
 - Abnahmeprotokoll.

6 PRÜFUNGEN

6.1 Prüfung der Erdwärmesonde

6.1.1 Die Erdwärmesonden werden von der Bohrfirma im Anschluss an das Versetzen, vor dem Verbinden zur Wärmepumpe, geprüft.

6.1.2 Die Abnahmeprüfung einer Erdwärmesonde erfolgt in 3 Stufen:

1. Spülen

Die Erdwärmesonde wird Kreis für Kreis ab Bauwasseranschluss oder Hydrant durchgespült, um allfällige Schmutzpartikel auszuspülen. Die Spüldauer ist so festzulegen, dass jeder Kreislauf einmal vollständig durchgespült ist. Die Spüldauer pro Kreis bezogen auf die Sondenlänge ist in den Figuren 32 und 33 in F.5 ersichtlich.

2. Durchflussprüfung

Mit der Durchflussprüfung wird sichergestellt, dass kein erhöhter hydraulischer Widerstand vorhanden ist. Bei konstanter Durchflussrate wird die Druckdifferenz zwischen Vorlauf und Rücklauf gemessen und mit dem theoretischen Wert aus B.1 verglichen.

2. Dichtheitsprüfung

Die Erdwärmesonde muss unmittelbar nach dem Einbringen der Hinterfüllung mit einem Kontraktionsverfahren in Anlehnung an SN EN 805 auf Dichtheit geprüft werden. Das Verfahren ist in B.2 beschrieben.

6.1.3 Sämtliche Messwerte der Durchfluss- und Dichtheitsprüfung sind in einem Abnahmeprotokoll festzuhalten. Das Abnahmeprotokoll enthält neben diesen Messwerten genaue Angaben zur Menge und Zusammensetzung der eingebrachten Hinterfüllung. Ein Musterprotokoll ist in A.2 enthalten.

6.2 Rohrverbindungen zwischen Erdwärmesonden und Wärmepumpe

Sofern die Dichtheitsprüfung der Erdwärmesonden nicht zusammen mit den Verbindungsleitungen erfolgt, sollen diese zusätzlich überprüft werden. Es soll mindestens eine Prüfung mit Pressluft und Lecksuchspray bei den Verbindungselementen durchgeführt werden. Bei nicht mehr zugänglichen Leitungen (z.B. Bodenplatte) erfolgt die Prüfung gemäss 6.1.

6.3 Frostschutz

Nach der Füllung ist die Frostschutzkonzentration zu messen und zu dokumentieren (siehe 5.7).

7 BETRIEB UND WARTUNG

7.1 Wartung

7.1.1 Eine Erdwärmesonde ist wartungsfrei. Der Fülldruck der Erdwärmesonde ist jährlich zu überprüfen. Die Nachfüllungen (Menge, Anfangs- und Enddruck) sind auf der Anlage zu protokollieren.

7.1.2 Alle 10 Jahre soll geprüft werden, ob der Korrosionsschutz des Wärmeträgers noch genügend ist oder ergänzt werden muss.

7.2 Abweichung des Wärmebedarfs

Ist der Wärmebedarf grösser als der für die Dimensionierung verwendete Normwärmebedarf, ergeben sich längere Laufzeiten der Wärmepumpe. Dies führt in der Regel zu einer massiven Auskühlung in der Umgebung der Erdwärmesonden und kann irreversible Schäden an der Erdwärmesonden-Anlage bewirken. Die Funktionssicherheit der Anlage ist in hohem Mass beeinträchtigt und die Anlage muss saniert oder ausser Betrieb gesetzt werden.

7.3 Bauheizung

7.3.1 Die Bauheizung darf grundsätzlich nicht über die Erdwärmesonden-Anlage erfolgen. Für die Bauheizung muss ein separates System eingesetzt werden.

7.3.2 Die Anlage darf nur dann als Bauheizung verwendet werden, wenn die dafür entzogene Energiemenge der Auslegung für diesen Zeitraum entspricht. Dies ist mit einer Berechnung nachzuweisen.

7.4 Bauaustrocknung

Je nach Bauweise (z.B. hochgedämmter Massivbau) wird für die Bauaustrocknung während der ersten Betriebsjahre ein erheblicher Mehrverbrauch an Wärme benötigt. Dieser Mehrverbrauch ist bei der Dimensionierung der Erdwärmesonden einzubeziehen oder steuerungstechnisch abzufangen. Dies kann z.B. durch Entlastung des Erdwärmesondenkreises geschehen, indem während der Bauaustrocknungsphase eine zweite Wärmequelle auf der Verbraucherseite zugeschaltet wird.

7.5 Stilllegung

7.5.1 Die definitive Stilllegung einer Erdwärmesonde ist der Bewilligungsbehörde zu melden. Sämtliche Erdwärmesondenrohre sind mit Wasser zu spülen und mit einer Suspension gemäss F.3 zu verpressen.

7.5.2 Der ausgespülte Wärmeträger ist umweltgerecht zu entsorgen.

A.2 Prüf- und Abnahmeprotokoll (normativ)

Die Durchflussprüfung ist detailliert in B.1 beschrieben und die Dichtheitsprüfung in B.2. Die Sollwerte sind gemäss B.2 bei speziellen Verhältnissen anzupassen.

Bohrfirma:		Prüf- und Abnahmeprotokoll für Erdwärmesonden								
Objekt:		Auftrag Nr. :								
Erdwärmesonden	Nr.	.....			.....			.....
Fabrik-Identifikations-Nummer	ID:	.....			.....			.....
Rollenpaar-Nummer (z.B. 0040)	Nr.	.....			.....			.....
Länge (eingebaute Sonde)	m	.....			.....			.....
Durchmesser aussen / Wandstärke	mm	/			/			/		
Durchflussprüfung		Prüfdatum								
		KL1/KL2	KL1	KL2	KL1/KL2	KL1	KL2	KL1/KL2	KL1	KL2
Wasser-Durchflussmenge	l / min	.....			.....			.....
Druck während Durchfluss	bar	.....			.....			.....
Bedingung erfüllt:	ja / nein	.....			.....			.....
Dichtheitsprüfung		Prüfdatum								
SIA 384/6		Sollwert	Istwert		Sollwert	Istwert		Sollwert	Istwert	
Ablesegenauigkeit 0.01 bar		KL1/KL2	KL1	KL2	KL1/KL2	KL1	KL2	KL1/KL2	KL1	KL2
Ablauf in Minuten	Prüfdruckverfahren für: (abhängig von EWS Länge und Dichte, B.2 Tabelle 4) Sonde mit Wasser verfüllen	bar	.....		bar	.....		bar	.....
0	Prüfdruck aufbringen	bar	.....		bar	.....		bar	.....
10	Druck Ende Druckhaltung	bar	.....		bar	.....		bar	.....
60	Ende stat. Druckabfall (zul. Druckabfall gemäss Hersteller) Druck nach Druckabsenkung (Absenkung 10% vom Prüfdruck, min. 1 bar) Menge abgelassenes Wasser (B.2 Tabelle 5)	bar	.....		bar	.....		bar	.....
65	Druck-Ablesung	bar	.....		bar	.....		bar	.....
75	Druck-Ablesung	bar	.....		bar	.....		bar	.....
90	Druck Ende Hauptprüfung	bar	.....		bar	.....		bar	.....
Bedingung erfüllt:	ja / nein	.....			.....			.....
Hinterfüllung		Standard: 100 kg Bentonit, 200 kg Zement, 900 l Wasser			Datum					
		Bentonit	Zement	Wasser	Bentonit	Zement	Wasser	Bentonit	Zement	Wasser
Menge in kg Bentonit, Zement, Wasser		.....			.....			.....
oder Fertigmischung: Fabrikat, Wasser/100 kg		.....			.....			.....
Gesamtmenge Hinterfüllung in kg / spez. Gewicht kg/m ³		.....			.....			.....
		ja / nein	Meter UK Terrain		ja / nein	Meter UK Terrain		ja / nein	Meter UK Terrain	
Bis UKT verfüllt ja, bei nein bis Meter UKT		.....			.....			.....
Abnahme		SIA Norm 118			Polier:			.....	
Ort und Datum:		.....			Bauleitung:			.....	

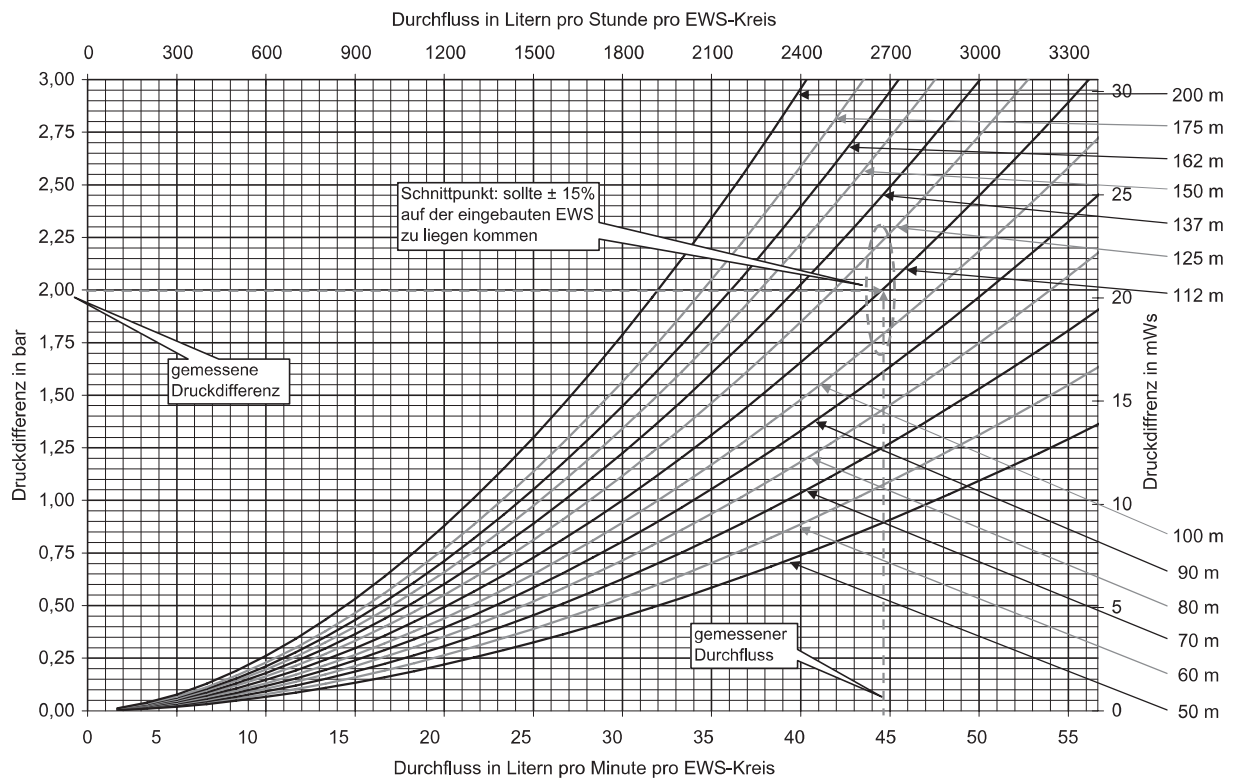
Anhang B (normativ)

Prüfungen

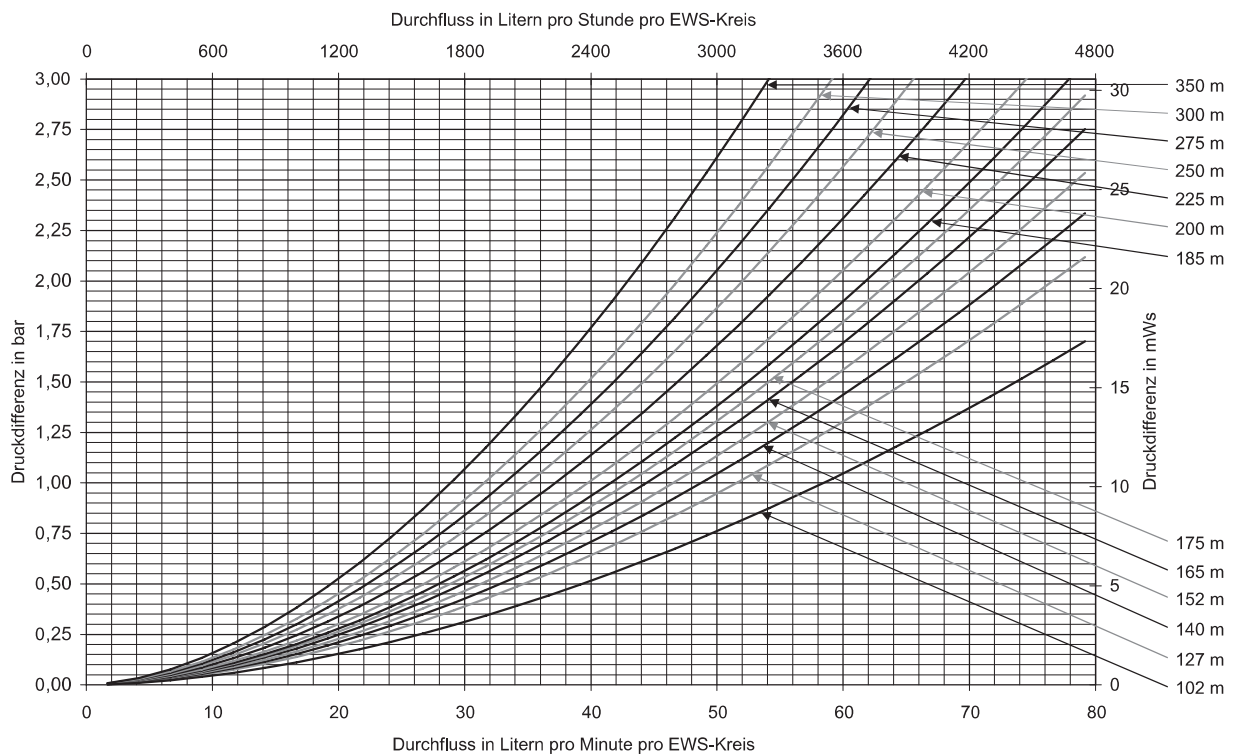
B.1 Durchflussprüfung

Die Durchflussprüfung pro Erdwärmesonde kann pro Einzelkreis oder mit beiden Kreisen gemeinsam inklusive allfälliger Verlängerungen (doppelte Durchflussrate, Zuleitung zu EWS dazuzählen) durchgeführt werden. Die Abweichung von der berechneten Druckdifferenz zur Messung darf $\pm 15\%$ nicht überschreiten. In den Figuren 2 und 3 sind für verschiedene Längen und Durchmesser die entsprechenden Druckdifferenzen zwischen Ein- und Austritt der EWS in Abhängigkeit der Durchflussrate angegeben. Die Resultate sind in ein Protokoll gemäss A.2 einzutragen.

Figur 2 Durchflussdiagramm EWS $\varnothing 32 \times 26$ mm pro Kreis bei Wasser 15°C und verschiedenen Erdwärmesondenlängen



Figur 3 Durchflussdiagramm EWS $\varnothing 40 \times 32,6$ mm pro Kreis bei Wasser 15°C und verschiedenen Erdwärmesondenlängen



B.2 Dichtheitsprüfung in Anlehnung an SN EN 805

B.2.1 Für die Prüfung einzuhaltende Bedingungen

B.2.1.1 Horizontale Verbindungsleitungen:

- Gleich bleibende Temperatur der Rohrwand über die Prüfdauer.
- Keine direkte Sonneneinstrahlung auf die Rohre.
- Prüfdruck mindestens 7,5 bar.

B.2.1.2 Erdwärmesonden:

- Lückenlose Hinterfüllung mit einer plastischen oder fließfähigen Suspension, die für die Prüfung noch nicht abgebunden sein darf.
- In Kluftzonen und in permeablen Bereichen, wo in Absprache mit den zuständigen Behörden die Hinterfüllung nicht komplett ausgeführt wurde, muss die Dichtheitsprüfung den Gegebenheiten angepasst werden, um eine Schädigung der Erdwärmesondenrohre zu verhindern. Dies gilt auch bei speziellen Typen von Erdwärmesonden (z.B. Kurzerdwärmesonden aus PE-100 SDR 17 oder 22, nach Herstellerangaben prüfen) oder bei Hinterfüllungen mit anderer Dichte (siehe Tabelle 4) als die der Standardhinterfüllung nach F.3.
- Keine direkte Sonneneinstrahlung auf die Rohre.
- Der Prüfdruck ist so gewählt, dass der Überdruck in den Rohren am Erdwärmesondenfuss während der ganzen Prüfung mindestens 0,5 bar ist und der Kopfdruck den Mindestdruck von 7,5 bar aufweist und auf der ganzen Länge der Druck von 21 bar nicht überschritten wird.

Tabelle 4 Minimal notwendiger Prüfdruck für Erdwärmesonden in Abhängigkeit der Hinterfüllung und Erdwärmesondenlänge

EWS-Länge	Dichte der Hinterfüllung				
	1200 kg/m ³	1400 kg/m ³	1600 kg/m ³	1800 kg/m ³	2000 kg/m ³
40 m	8 bar	8 bar	8 bar	9 bar	10 bar
60 m	8 bar	8 bar	10 bar	11 bar	12 bar
80 m	8 bar	9 bar	11 bar	13 bar	16 bar
100 m	8 bar	10 bar	12 bar	16 bar	16 bar
120 m	8 bar	11 bar	14 bar	16 bar	16 bar
140 m	9 bar	11 bar	16 bar	16 bar	16 bar
160 m	9 bar	13 bar	16 bar	16 bar	16 bar
180 m	10 bar	14 bar	16 bar	16 bar	16 bar
200 m	10 bar	16 bar	16 bar	16 bar	16 bar
220 m	10 bar	16 bar	16 bar	16 bar	keine EWS
240 m	11 bar	16 bar	16 bar	16 bar	keine EWS
260 m	11 bar	16 bar	16 bar	16 bar	keine EWS
280 m	11 bar	16 bar	16 bar	keine EWS	keine EWS
300 m	12 bar	16 bar	16 bar	keine EWS	keine EWS
320 m	13 bar	16 bar	16 bar	keine EWS	keine EWS
340 m	14 bar	16 bar	16 bar	keine EWS	keine EWS
360 m	14 bar	16 bar	keine EWS	keine EWS	keine EWS
380 m	15 bar	16 bar	keine EWS	keine EWS	keine EWS
400 m	16 bar	16 bar	keine EWS	keine EWS	keine EWS

Der maximal zulässige Prüfdruck für PE-100 SDR 11 beträgt 21 bar.

- Dichtheitsprüfung ohne Vorbehalt zugelassen.
- Erdwärmesonden können nur eingebaut werden, wenn der Kopf dicht verschlossen ist. Die Dichtheitsprüfung kann erst gemacht werden, wenn der Kopfdruck unter 8 bar gefallen ist. Die angegebenen Werte gehen von einem Kopfdruck von 8 bar aus.
- Es können keine Erdwärmesonden mehr eingebaut werden.

B.2.2 Durchführung der Dichtheitsprüfung

- a) 1 h Ruhezeit der zu messenden Rohre in nicht belastetem Zustand ①
- b) Aufbauen des Prüfdruckes bei U-Rohr-EWS PN 16 bar nach Tabelle 4 oder bis zum maximal zulässigen Prüfdruck nach Herstellerangaben ②
- c) 10 min Aufrechterhalten des Prüfdruckes ③ bis ③E
- d) 1 h Wartezeit. Während dieser Zeit kann das Rohr vollständig expandieren ③E bis ④.
- e) Messung des verbleibenden Druckes ④. Die Abnahme, verursacht durch die Rohrex-pansion, darf nicht grösser sein als vom Sondenhersteller angegeben. Grössere Abwei-chungen sind auf Lufteinschlüsse oder Leckagen zurückzuführen. Die Prüfung ist bei Punkt a) wieder zu beginnen.
- f) Rasche Druckentlastung um 10% des Prüfdruckes, minimal 1 bar, durch Ablassen von Wasser. Die abgelassene Wassermenge und der neue Druckwert ist zu messen ⑤. Kon-trolle der Wassermenge nach Tabelle 5, multipliziert mit der Erdwärmesondenlänge. Eine grössere Ablassmenge ist auf Lufteinschlüsse zurückzuführen. Die Prüfung ist bei Punkt a) wieder zu beginnen.
- g) 10 min 1. Druckmessung ⑥A
- h) 20 min 2. Druckmessung ⑥B
- i) 30 min 3. und letzte Druckmessung ⑥C

Die Dichtheitsprüfung ist bei kontinuierlichen Messungen bestanden, wenn der maximale Druckabfall vom Maximalwert (gemessen ab ⑤ bis zum Wert bei ⑥C) weniger als 0,1 bar beträgt. Bei Handmessungen wird der maximale Druckabfall von ⑥A bis ⑥C bestimmt.

Material: Manometer mit einer Auflösung besser 0,01 bar; Druckbereich entsprechend der Prüfung; 2 Schieber; Entlüftung; Druckpumpe; Messbecher 1 l; alle Anschlüsse sind auf 21 bar auszulegen.

Die Resultate sind in das Protokoll A.2 einzutragen oder als Diagramm gemäss untenstehendem Beispiel auszudrucken.

Figur 4 Dichtheitsprüfung von Erdwärmesonden in Anlehnung an SN EN 805, Beispiel Prüfdruck 12 bar, Druckabfall während der Ruhephase 27%

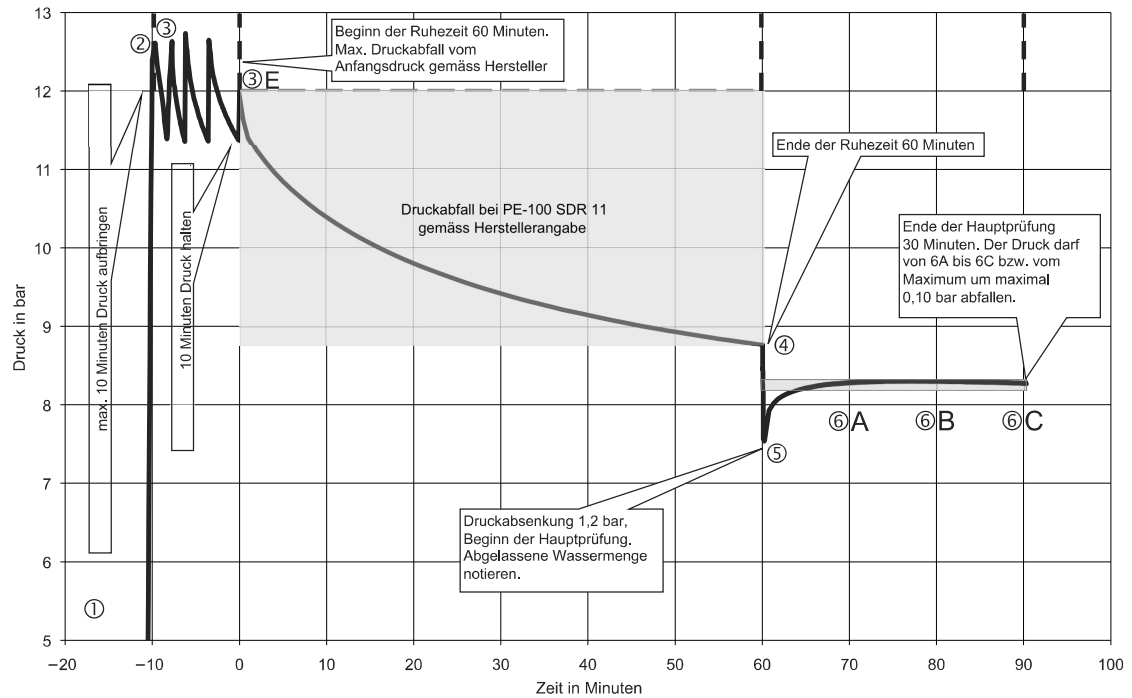


Tabelle 5 Zulässige abgelassene Wassermenge pro Meter Erdwärmesonde nach SN EN 805, die für die Druckabsenkung nicht überschritten werden darf

Erdwärmesonde PE-100 SDR 11 Duplex		
Ø aussen	32 mm	40 mm
Ø innen	26 mm	32,6 mm
Wanddicke	3 mm	3,7 mm
rasche Druckabsenkung	max. zulässige abgelassene Wassermenge pro Meter Erdwärmesonde	
1,0 bar	1,966 ml/m	3,139 ml/m
1,1 bar	2,163 ml/m	3,453 ml/m
1,2 bar	2,360 ml/m	3,767 ml/m
1,3 bar	2,556 ml/m	4,081 ml/m
1,4 bar	2,753 ml/m	4,395 ml/m
1,5 bar	2,949 ml/m	4,709 ml/m
1,6 bar	3,146 ml/m	5,023 ml/m
1,7 bar	3,343 ml/m	5,337 ml/m
1,8 bar	3,539 ml/m	5,651 ml/m
1,9 bar	3,736 ml/m	5,965 ml/m
2,0 bar	3,933 ml/m	6,279 ml/m
2,1 bar	4,129 ml/m	6,593 ml/m

Anhang C (informativ)

Kennwerte

C.1 Allgemeines

Je nach Grösse eines Projektes (d.h. Anzahl der EWS) können unterschiedlich aufwendige Verfahren zur Bestimmung der geophysikalischen Parameter eingesetzt werden. Für die Dimensionierung der EWS werden die am Standort der EWS gemessenen oder geschätzten thermischen Gesteinseigenschaften abzüglich der Toleranz bestimmt (siehe 2.3.2, Tabelle 1).

C.2 Bodentemperatur und Bodenoberflächentemperatur

C.2.1 Allgemeines

C.2.1.1 Die Bodentemperatur ist eine Funktion der Bodenoberflächentemperatur, des Temperaturgradienten, der Wärmeleitfähigkeit des Bodens, des Wärmeflusses und weiterer, lokaler Einflüsse wie Grundwasserströmungen. Die Bodenoberflächentemperatur wird durch mehrere Faktoren beeinflusst:

- Höhe,
- Lage (z.B. Nord-/Süd-Exposition; Stadt/Land),
- Beschattung,
- Grundwasserfluss,
- lokalen geothermischen Wärmefluss.

C.2.1.2 Die Bodenoberflächentemperatur am Standort kann in erster Annäherung aufgrund der Höhe über Meer bestimmt werden. Etwas genauer kann sie aus der mittleren Jahrestemperatur, die lokale Verhältnisse mitberücksichtigt, berechnet werden. Genaue Daten können durch die Messung eines Temperaturprofils entlang einer EWS erhalten werden.

C.2.2 Bestimmung der Bodenoberflächentemperatur am Standort aus der Höhe über Meer

C.2.2.1 Da ein Zusammenhang zwischen Höhenlage und Bodenoberflächentemperatur besteht, kann die Bodenoberflächentemperatur in erster Näherung direkt aus der Standorthöhe bestimmt werden. Lokale Verhältnisse sind dabei nicht berücksichtigt, entsprechend gross sind die Toleranzwerte zu bemessen.

C.2.2.2 Die Figuren 5 und 6 stellen die Jahresmitteltemperaturen für verschiedene Standorte der Alpennordseite und -südseite (berechnet mit der Software Meteonorm [11]) und die entsprechenden Bodenoberflächentemperaturen (berechnet anhand der Gleichungen 9 und 10) dar. Aus der Figur können nachfolgende Gleichungen abgeleitet werden. Diese Gleichungen gelten nur für einen Höhenbereich von 200 bis 1800 m ü.M. Für den Heizfall können für die Berechnung der Bodenoberflächentemperatur die Gleichungen 2 und 5 und für den Kühlfall die Gleichungen 3 und 6 eingesetzt werden.

Alpennordseite:

Jahresmitteltemperatur:

$$\theta_{e,a,m} = -4,7 \cdot 10^{-3} \cdot H_S + 11,4 \quad (1)$$

Bodenoberflächentemperatur, mit Toleranzwert für den Heizfall (graue Kurve in Figur 5):

$$\theta_{G,s,H} = 1,373 \cdot 10^{-6} \cdot H_S^2 - 7,03 \cdot 10^{-3} \cdot H_S + 12,5 \quad (2)$$

Bodenoberflächentemperatur, mit Toleranzwert für den Kühlfall (schwarze Kurve in Figur 5):

$$\theta_{G,s,C} = 1,373 \cdot 10^{-6} \cdot H_S^2 - 6,72 \cdot 10^{-3} \cdot H_S + 15,8 \quad (3)$$

Alpensüdseite:

Jahresmitteltemperatur:

$$\theta_{e,a,m} = -5,2 \cdot 10^{-3} \cdot H_S + 12,8 \quad (4)$$

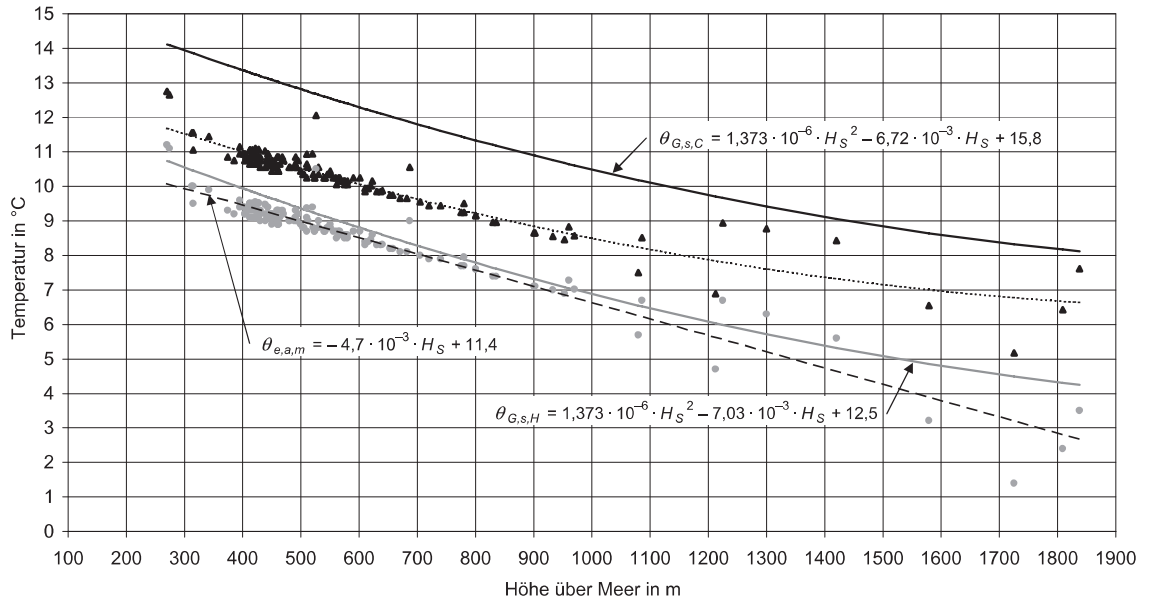
Bodenoberflächentemperatur, mit Toleranzwert für den Heizfall (graue Kurve in Figur 6):

$$\theta_{G,s,H} = 2,277 \cdot 10^{-6} \cdot H_S^2 - 8,30 \cdot 10^{-3} \cdot H_S + 13,8 \quad (5)$$

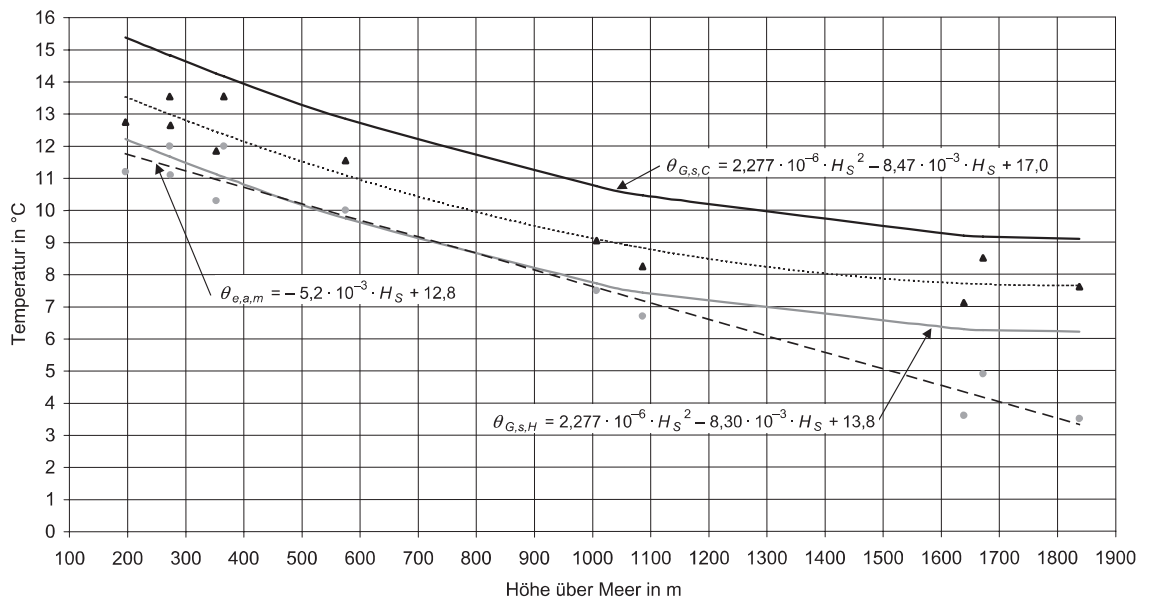
Bodenoberflächentemperatur, mit Toleranzwert für den Kühlfall (schwarze Kurve in Figur 6):

$$\theta_{G,s,C} = 2,277 \cdot 10^{-6} \cdot H_S^2 - 8,47 \cdot 10^{-3} \cdot H_S + 17,0 \quad (6)$$

Figur 5 Jahresmitteltemperaturen für verschiedene Standorte der Alpennordseite, berechnet mit der Software [11], und die entsprechenden Bodenoberflächentemperaturen, berechnet anhand der Gleichungen 9 und 10. Dargestellt sind zudem die Kurven mit Toleranzwertzuschlag (als Hüllkurve gerechnete Bodenoberflächentemperatur $\pm 0,5$ K) für den Heiz- und Kühlfall. Diese Kurven gelten nur für einen Höhenbereich von 200 bis 1800 m ü.M.



Figur 6 Jahresmitteltemperaturen für verschiedene Standorte der Alpensüdseite analog zu Figur 5



- Bodenoberflächentemperatur für Kühlen
- Bodenoberflächentemperatur Regressionskurve
- Bodenoberflächentemperatur für Heizen
- - - mittlere Jahrestemperatur Regressionsgerade
- ▲ Bodenoberflächentemperatur
- mittlere Jahrestemperatur

C.2.3 **Bestimmung der Bodenoberflächentemperatur bei bekannter mittlerer Jahrestemperatur**

Ist die Jahresmitteltemperatur am Standort bekannt (z.B. berechnet mit der Software [11]), kann die Bodenoberflächentemperatur aus der Standorthöhe nach folgenden Gleichungen berechnet werden [5].

Bodenoberflächentemperatur für Standorthöhe < 1000 m ü.M.

$$\theta_{G,s} = \theta_{e,a,m} + 1,55 \quad (7)$$

Bodenoberflächentemperatur für Standorthöhe > 1000 m ü.M.

$$\theta_{G,s} = \theta_{e,a,m} + 1,55 + \frac{H_S - 1000}{800} \cdot 2,45 \quad (8)$$

$\theta_{e,a,m}$ mittlere Jahresausserlufttemperatur, in °C
 $\theta_{G,s}$ Bodenoberflächentemperatur, in °C
 H_S Standorthöhe, m ü.M.

Wegen lokaler Unsicherheiten, z.B. des Einflusses der Exposition, wird für die Dimensionierung ein Toleranzwert von 1 K für Heizzwecke (Gleichung 9) subtrahiert und für Kühlzwecke (Gleichung 10) addiert.

Bodenoberflächentemperatur, mit Toleranzwert für den Heizfall:

$$\theta_{G,s,H} = \theta_{G,s} - 1 \quad (9)$$

Bodenoberflächentemperatur, mit Toleranzwert für den Kühlfall:

$$\theta_{G,s,C} = \theta_{G,s} + 1 \quad (10)$$

C.3 Boden- und Stoffkennwerte

Tabelle 6 Bodenkennwerte. Der Wertebereich basiert auf Literaturdaten. Ohne weitere Kenntnisse sind die für die Schweiz empfohlenen Rechenwerte zu verwenden. In begründeten Fällen kann davon abgewichen werden.

	Gesteinstyp	Wärmeleitfähigkeit λ W/(m·K)		Spez. Wärmekapazität ρ_c MJ/(m ³ ·K)		Dichte ρ 10 ³ kg/m ³
		Wertebereich	Empfohlener Rechenwert	Wertebereich	Empfohlener Rechenwert	
	Ton, trocken	0,4 – 1,0	0,6	1,5 – 1,6	1,5	1,8 – 2,0
	Ton, wassergesättigt	0,9 – 2,3	1,4	2,0 – 2,8	2,3	2,0 – 2,2
	Sand, trocken	0,3 – 0,8	0,5	1,3 – 1,6	1,4	1,8 – 2,2
	Sand, wassergesättigt	1,5 – 4,0	2,3	2,2 – 2,8	2,4	1,9 – 2,3
	Kies/Steine, trocken	0,4 – 0,5	0,4	1,3 – 1,6	1,4	1,8 – 2,2
	Kies/Steine, wassergesättigt	1,6 – 2,0	1,7	2,2 – 2,6	2,3	1,9 – 2,3
	Moräne fest gelagert	1,7 – 2,4	1,8	1,5 – 2,5	2,0	1,9 – 2,5
	Torf	0,2 – 0,7	0,4	0,5 – 3,8	1,6	0,5 – 0,8
Sedimentäre Festgesteine	Schweizer Molassegestein	Siehe Tabelle 7		1,8 – 2,6	2,1	2,4 – 2,7
	Tonstein	1,1 – 3,5	1,9	2,1 – 2,4	2,2	2,4 – 2,6
	Sandstein		2,3	1,8 – 2,6	2,1	2,2 – 2,7
	Konglomerat/Brekzie	1,3 – 5,1	2,6	1,8 – 2,6	2,1	2,2 – 2,7
	Mergelstein	Locker- gesteine	2,1	2,2 – 2,3	2,2	2,3 – 2,6
	Kalkstein	2,5 – 4,0	2,8	2,1 – 2,4	2,2	2,4 – 2,7
	Sulfatgestein (Gips)	1,3 – 2,8	1,6		2,0	
Magmatische Festgesteine	Granit	2,1 – 4,1	2,8	2,1 – 3,0	2,4	2,4 – 3,0
	Diorit	2,0 – 2,9	2,3		2,7	2,9 – 3,0
	Gabbro	1,7 – 2,5	2,0		2,6	2,8 – 3,1
Metamorphe Festgesteine	Tonschiefer	1,5 – 2,6	1,9	2,2 – 2,5	2,3	2,4 – 2,7
	Marmor	1,3 – 3,1	1,9		2,0	2,5 – 2,8
	Quarzit	5,0 – 6,0	5,3		2,1	2,5 – 2,8
	Glimmerschiefer	1,5 – 3,1	2,0	2,2 – 2,4	2,3	2,4 – 2,7
	Gneis	1,9 – 4,0	2,6	1,8 – 2,4	2,0	2,4 – 2,7
	Amphibolit	2,1 – 3,6	2,6	2,0 – 2,3	2,1	2,6 – 2,9
Diverse Stoffe	Bentonit-Zement-Gemisch (Hinterfüllung ausgehärtet)		0,8		3,0	1,2
	Beton	0,9 – 2,0	1,4		1,8	2,0 – 2,42
	Eis (–10 °C)		2,32		1,87	0,91
	Polyethylen (PE100)		0,4		1,63	0,96
	Luft (0 °C – 20 °C)		0,02		0,0012	0,00124
	Stahl		60,0		3,12	7,8
	Wasser (10 °C)		0,6		4,15	0,99

Tabelle 7 Wärmeleitfähigkeiten im schweizerischen Molassegestein [7]. Der Wertebereich basiert auf Messdaten im Schweizer Mittelland. Ohne weitere Kenntnisse sind die für die Schweiz empfohlenen Rechenwerte zu verwenden. In begründeten Fällen kann davon abgewichen werden.

Molasse	Gesteinstyp	Wärmeleitfähigkeit λ W/(m·K)	
		Wertebereich	Empfohlener Rechenwert
Obere Süsswassermolasse	Tonstein – Siltstein	2,3 – 2,4	2,3
	Siltstein	2,3 – 2,4	2,3
	Feinsandstein	2,3 – 2,6	2,3
	Mittelsandstein	2,5 – 2,8	2,6
	Grobsandstein und Konglomerat	2,5 – 2,8	2,6
Obere Meeresmolasse	Tonstein – Siltstein	2,6 – 2,9	2,7
	Siltstein	2,6 – 2,9	2,7
	Feinsandstein	2,7 – 3,3	2,9
	Mittelsandstein	2,7 – 3,2	2,8
	Grobsandstein und Konglomerat	2,6 – 3,0	2,7
Untere Süsswassermolasse	Tonstein – Siltstein	2,2 – 2,7	2,3
	Siltstein	2,3 – 2,8	2,4
	Feinsandstein	2,4 – 2,8	2,5
	Mittelsandstein	2,7 – 3,2	2,9
	Grobsandstein und Konglomerat	2,2 – 3,1	2,4

Wertebereich = Mittelwert \pm Standardabweichung

Empfohlener Rechenwert = Mittelwert $-0,5$ Standardabweichung

C.4 Wärmeträger

Die zulässigen Wärmeträger sind in der BAFU-Vollzugshilfe (siehe 0.2.3) aufgeführt.

In Wärmeträgern dürfen als Zusatzstoffe (z.B. als Korrosionsinhibitor) keine biologisch schwer abbaubaren Stoffe, keine chlorierten Verbindungen und keine Schwermetallsalze verwendet werden.

Die kantonalen Gewässerschutzstellen können diese Liste einschränken oder ergänzen.

Tabelle 8 Eigenschaften der hauptsächlich eingesetzten Wärmeträger

Träger	Dichte bei 0 °C kg/m ³	Zähigkeit mm ² /s	Frostschutz °C	Ausdehnungsfaktor 0 °C bis 20 °C
Ethylenglykol 20%	1036,72	3,49	-10,6	0,00428
Ethylenglykol 25%	1046,08	4,05	-13,6	0,00489
Ethylenglykol 30%	1055,51	4,72	-16,9	0,00552
Propylenglykol 25%	1031,96	5,97	-10,1	0,00741
Propylenglykol 30%	1037,82	7,58	-13,5	0,00803
Propylenglykol 35%	1043,61	9,65	-17,5	0,00865
Wasser 5 °C	1000,54	1,50	0,0	0,00197
Ethanol 20%	969,00	4,29	-10,5	0,01491
Ethanol 25%	961,50	5,13	-15,5	0,01872
Ethanol 30%	954,00	5,96	-20,5	0,02268

Der Ausdehnungsfaktor gibt die volumetrische Ausdehnung von 0 °C auf 20 °C an. Er kann für die Berechnung des Expansionsgefässes für den Erdwärmesondenkreis verwendet werden (3.3.2.6), solange keine grösseren Kältelasten abgeführt werden.

Beispiel:

Anlageninhalt 1000 Liter, Frostschutz 20% Ethylenglykol. Gesucht ist die Grösse des Expansionsgefässes. Sicherheitsfaktor (nach 3.3.2.6) $s = 3$.

Nutzungsgrad des Expansionsgefässes bei 1 bar Vordruck und einem maximalen Druck von 3 bar:

$$\eta_{exp} = \frac{p_m - p_p}{p_m + 1} = \frac{3 - 1}{3 + 1} = 0,5 \quad (11)$$

η_{exp} Nutzungsgrad des Expansionsgefässes

p_m maximaler Druck, in bar

p_p Vordruck, in bar

Minimales Volumen des Expansionsgefässes

$$V_{exp,min} = \frac{\gamma_{exp} \cdot V_{BHE} \cdot s}{\eta_{exp}} = \frac{0,00428 \cdot 1000 \cdot 3}{0,5} = 25,68 \quad (12)$$

$V_{exp,min}$ minimales Volumen des Expansionsgefässes, in l

γ_{exp} Ausdehnungsfaktor

V_{BHE} Inhalt Erdwärmesonden und Erdwärmesondenkreis, in l

s Sicherheitsfaktor nach Ziffer 3.3.2.6 = 3

Anhang D (informativ)

Projektierungshinweise

D.1 Bewilligung

- D.1.1 Um die gesetzlichen Anforderungen bezüglich des Gewässerschutzes einzuhalten, sind die Anforderungen und Vorschriften in der BAFU-Vollzugshilfe (siehe 0.2.3) zu erfüllen. Die kantonalen Gewässerschutzbehörden geben Auskunft darüber, ob eine gewässerschutzrechtliche Bewilligung für den vorgesehenen Standort möglich ist.
- D.1.2 Die für die Betriebsbewilligung notwendigen Anlagendokumentationen und -beschreibungen sind zuhänden der Bewilligungsbehörden vollständig abzugeben.
- D.1.3 Die Festlegung von Grenzabständen von Erdwärmesonden zu Nachbargrundstücken ist Sache der Bewilligungsbehörden.
- D.1.4 Bohrungen sind neben dem Gebäude abzuteufen. Bei Platzmangel kann auch der Bereich unter dem Gebäude genutzt werden, sofern von den Behörden zugelassen.

D.2 Geologie

Geologische Erkenntnisse, die aus relevanten Untersuchungen des Untergrundes in der Umgebung stammen oder bei benachbarten Bauprojekten (Bohrungen, Strassen, Baugruben usw.) gemacht wurden, sollten bei der Projektierung berücksichtigt werden. Wichtige Informationsquellen stehen hierfür bei den geologischen Archivierungsstellen einiger Kantone und des Bundes zur Verfügung.

D.3 Vereinfachtes Berechnungsverfahren für einfache Anlagen

D.3.1 Allgemeines

- D.3.1.1 In den Ziffern 3.2.3 und 3.2.4 werden einfache und komplexe Anlagen definiert. Die Figuren 7 bis 19 für die Berechnung von einfachen Anlagen wurden mit g-Funktionen [6] berechnet.
- D.3.1.2 Das Gesamtsystem ist umso effizienter, je geringer die Temperaturdifferenz zwischen der Erdwärmesonde und dem Wärmeabgabesystem ist.
- D.3.1.3 Für die Berechnung einer einfachen Erdwärmesonden-Anlage sind folgende Daten notwendig:
- Standort (Geologie und Bodenoberflächentemperatur: siehe C.2 und C.3),
 - Wärmebedarf,
 - eingesetzte Wärmepumpe,
 - Anordnung der Erdwärmesonden und Zuleitungslängen,
 - Dimension der Zuleitungen.
- D.3.1.4 Wenn bei einer Erdwärmesonde eine Leistung angegeben wird, bezieht sich diese immer auf gewisse Randbedingungen. Da jede Anlage unterschiedliche Randbedingungen aufweist, müssen die Leistungswerte mit verschiedenen Korrekturfaktoren versehen werden, um die Erdwärmesonde auf die Kälteleistung der Wärmepumpe auslegen zu können. In den folgenden Diagrammen können die verschiedenen Korrekturfaktoren herausgelesen werden.
- D.3.1.5 Die Kälteleistung der Wärmepumpe wird durch die Quelltemperatur (Erdwärmesonde) und die maximale Auslegetemperatur der Heizung (Kondensatortemperatur) bestimmt. Üblicherweise wird der Auslegepunkt B0W35 der Wärmepumpe gemäss SN EN 14511-1 verwendet. Bei tieferen Auslegetemperaturen ist der entsprechende Auslegepunkt (z.B. B0W30) zu verwenden.

D.3.2 Spezifische Leistung der Duplex-Erdwärmesonde mit Durchmesser 32 mm

Die Wärmeleitfähigkeit steht in einem engen Verhältnis zur Leistungsfähigkeit einer Erdwärmesonde. Die Wärmekapazität spielt eine untergeordnete Rolle. Figur 7 stellt die Normleistung einer

Duplex-Erdwärmesonde mit Durchmesser 32 mm bei verschiedenen Wärmeleitfähigkeiten und Wärmekapazitäten des Erdreichs für folgende Randbedingungen dar:

- eine allein stehende EWS à 100 m Länge,
- mittlere Bodentemperatur von 10 °C,
- Bohrlochhinterfüllung mit 0,85 W/(m·K),
- 1850 Betriebsstunden pro Jahr,
- turbulente Strömung,
- Wärmeträger-Eintritt in EWS –3 °C, Austritt aus EWS 0 °C.

Auf der Y-Achse kann die Leistung nur für diese Normbedingungen direkt abgelesen werden. Mit der Normleistung kann die Normlänge der Erdwärmesonde bestimmt werden. Für die Auslegung der Erdwärmesonde ist die Kälteleistung der Wärmepumpe massgebend. Somit gilt:

$$L_{BHE,N} = \frac{\Phi_e}{P_{BHE,N}} \quad (13)$$

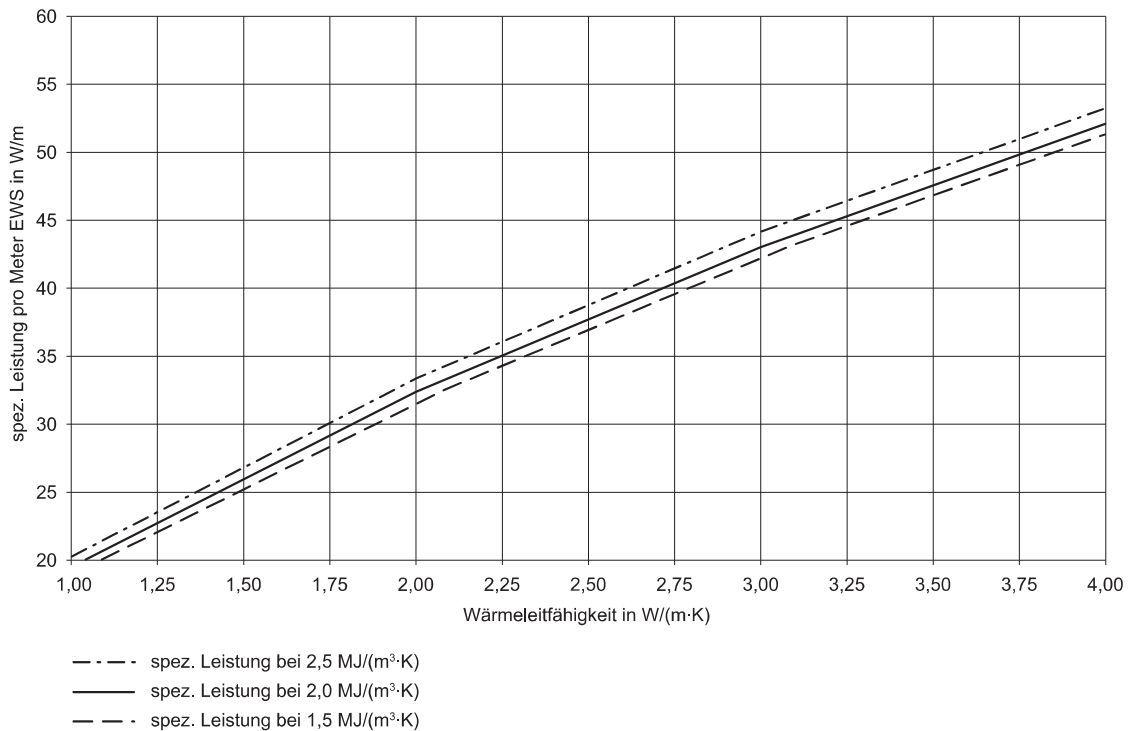
$L_{BHE,N}$ Normlänge der Erdwärmesonde bei Normbedingungen, in m

Φ_e Kälteleistung der WP im Auslegepunkt, in kW

$P_{BHE,N}$ Normleistung der Erdwärmesonde bei Normbedingungen (Figur 7), in W/m

Für andere Randbedingungen müssen die entsprechenden Korrekturfaktoren angewendet werden, die im Folgenden beschrieben werden.

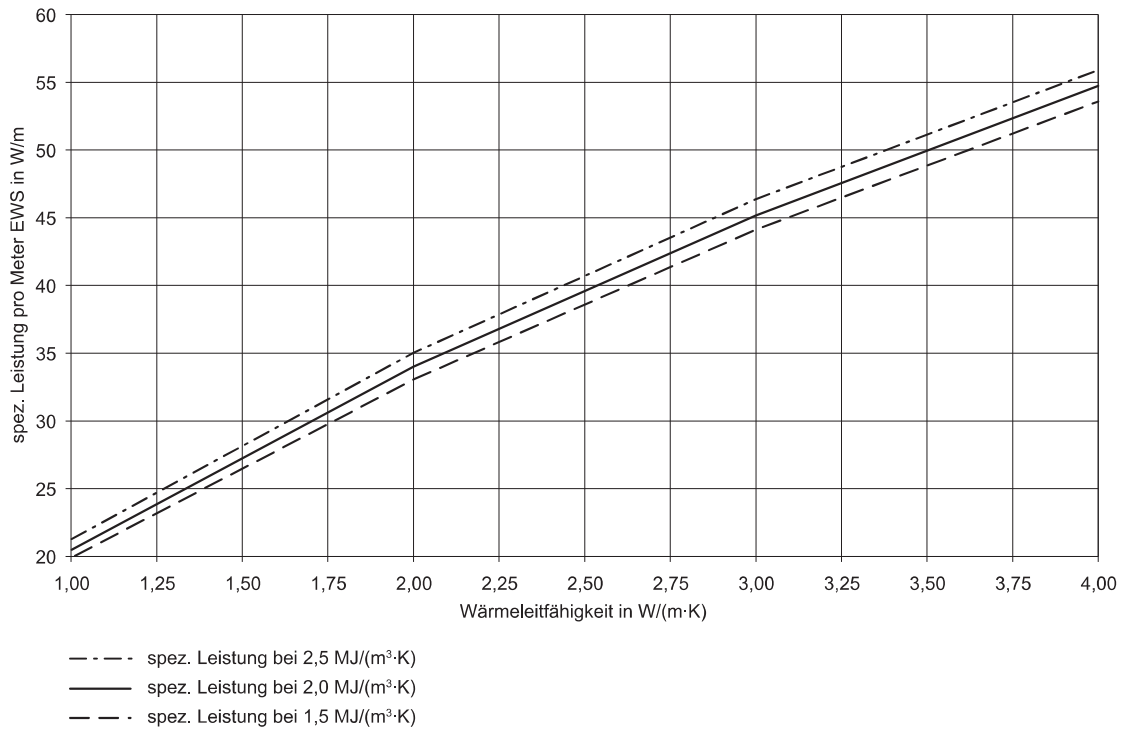
Figur 7 Normleistung bei 1 EWS à 100 m, Ø 32 mm, Duplex, bei 10 °C mittlerer Bodentemperatur und 1850 h Volllastzeit bei verschiedenen Wärmeleitfähigkeiten und Wärmekapazitäten des Erdreichs



D.3.3 Spezifische Leistung der Duplex-Erdwärmesonde mit Durchmesser 40 mm

Der Vergleich mit Figur 7 zeigt, dass eine Duplex-Erdwärmesonde mit 40 mm Durchmesser 5% mehr leistet als eine mit 32 mm Durchmesser. Die Bestimmung der spezifischen Leistung und der Normlänge erfolgt analog zu D.3.2.

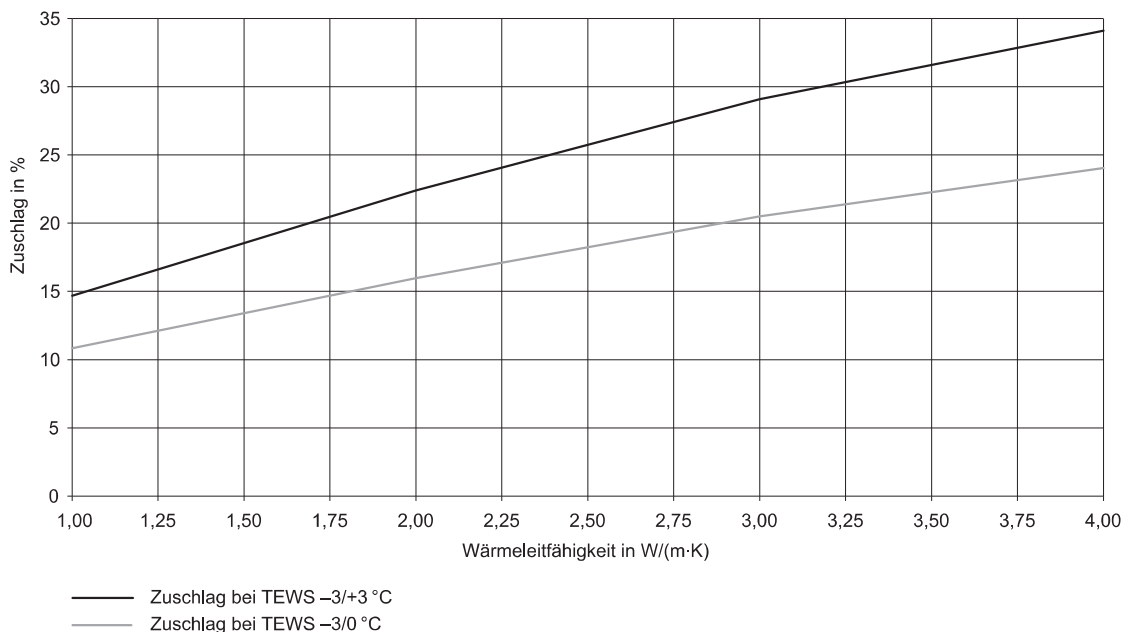
Figur 8 Normleistung bei 1 EWS à 100 m, Ø 40 mm, Duplex, bei 10°C mittlerer Bodentemperatur und 1850 h Volllastzeit bei verschiedenen Wärmeleitfähigkeiten und Wärmekapazitäten des Erdreichs



D.3.4 Korrekturfaktor für Simplex-Erdwärmesonden

In gewissen Ländern (Schweden, Österreich) werden auch häufig Simplex-Erdwärmesonden eingebaut. Diese Erdwärmesonden bestehen aus nur einem Kreis. Bei Ausfall eines Kreises einer Duplex-EWS verhält sich der übrig gebliebene Kreis wie eine Simplex-Erdwärmesonde. Durch die geringere Tauscherfläche ist die Leistung kleiner und muss nach Figur 9 mit einem Längenzuschlag kompensiert werden. Figur 9 zeigt die Standard-Auslegung bei $\theta_{BHE,in} = -3^\circ\text{C}$, $\theta_{BHE,out} = 0^\circ\text{C}$ sowie eine Auslegung $\theta_{BHE,in} = -3^\circ\text{C}$, $\theta_{BHE,out} = +3^\circ\text{C}$. Die grosse Spreizung kann bei Ausfall eines Kreises entstehen, wenn die Durchflussmenge nicht der Leistung des Kreises angepasst werden kann.

Figur 9 Zuschlag für die Sondenlänge bei Simplex-Erdwärmesonden gegenüber Duplex-Erdwärmesonden bei vollem und reduziertem Durchfluss



D.3.5 Jahresbetriebszeit

D.3.5.1 Unterscheidet sich die Jahresbetriebszeit einer Anlage von den 1850 Betriebsstunden unter Normbedingungen (siehe D.3.2), muss die Leistungsfähigkeit der Erdwärmesonde entsprechend korrigiert werden. Die Jahresbetriebszeit ist vom Standort, von der Grösse der Wärmepumpe im Verhältnis zum Wärmebedarf, vom Warmwasserbedarf usw. abhängig. Sie berechnet sich in erster Näherung wie folgt:

$$t_a = \frac{Q_a}{\Phi_{HPc}} \quad (14)$$

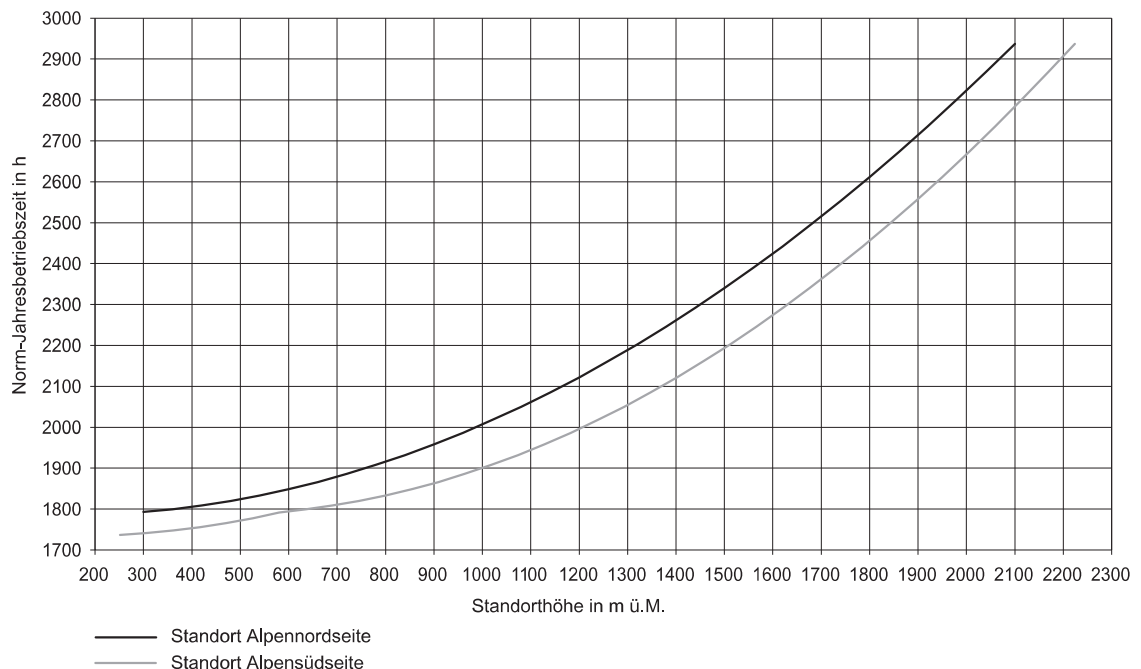
t_a Jahresbetriebszeit, in h
 Q_a Jahreswärmebedarf, in kWh
 Φ_{HPc} Heizleistung der Wärmepumpe im Auslegepunkt, in kW

D.3.5.2 Je höher der Standort ist, desto länger ist der Winter. Die Norm-Jahresbetriebsstunden in Abhängigkeit der Standorthöhe können aus Figur 10 entnommen werden. Die Norm-Jahresbetriebsstunden entsprechen den Jahresbetriebsstunden für den Fall, dass die Heizleistung der Wärmepumpe gleich dem Normleistungsbedarf ist. Unterscheiden sich die benötigte Norm-Heizleistung und die Heizleistung der gewählten Wärmepumpe, muss die Jahresbetriebszeit entsprechend Gleichung 15 gewichtet werden. Gleichung 15 zeigt, dass bei einer knapp dimensionierten Wärmepumpe die Jahresbetriebszeit grösser wird.

$$t_{a,H} = \frac{t_{a,N} \cdot \Phi_{HL}}{\Phi_{HPc}} \quad (15)$$

$t_{a,H}$ Jahresbetriebszeit Heizung, in h
 $t_{a,N}$ Norm-Jahresbetriebszeit, in h
 Φ_{HL} Norm-Heizlast, in kW
 Φ_{HPc} Heizleistung der Wärmepumpe im Auslegepunkt, in kW

Figur 10 Norm-Jahresbetriebszeit in Abhängigkeit vom Standort für die Alpennord- und -südseite



D.3.5.3 Zur Jahresbetriebszeit für die Heizung müssen andere Wärmebezüger wie Trinkwarmwassererwärmung dazu addiert werden. Der Jahreswärmebedarf für Warmwasser kann wie folgt berechnet werden:

$$Q_{ww} = \frac{M_{ww} \cdot (\theta_{ww} - \theta_w) \cdot c_w}{3600} \cdot 365 \quad (16)$$

Q_{ww} Jahreswärmebedarf Warmwasser, in kWh
 M_{ww} Warmwasserbedarf pro Tag, in kg
 θ_{ww} Warmwassertemperatur, in °C
 θ_w Kaltwassertemperatur, in °C
 c_w spez. Wärmekapazität Wasser, in kJ/(kg·K)

D.3.5.4 Für das Gesamtsystem berechnet sich die Jahresbetriebszeit wie folgt:

$$t_{a,HP,tot} = t_{a,H} + \frac{Q_e}{\Phi_{HP,e}} \quad (17)$$

$t_{a,HP,tot}$ Jahresbetriebszeit WP für Gesamtsystem, in h
 $t_{a,H}$ Jahresbetriebszeit Heizung, in h
 Q_e jährlicher Zusatzwärmebedarf, in kWh
 $\Phi_{HP,e}$ Heizleistung der WP für Zusatzwärmebedarf, in kW

D.3.5.5 Beispiel für ein Haus mit 10 kW Heizbedarf und 300 l Warmwasserverbrauch pro Tag (10 °C auf 50 °C), Standorthöhe von 800 m ü.M., Wärmepumpe mit einer Leistung von 10,5 kW.

Aus Figur 10 ergeben sich bei 800 m ü.M. 1916 Stunden Norm-Jahresbetriebszeit. Nach Gleichung 15 ergibt sich die folgende Jahresbetriebszeit für die Heizung:

$$t_{a,H} = \frac{1916 \text{ h} \cdot 10 \text{ kW}}{10,5 \text{ kW}} = 1824,8 \text{ h}$$

Um die Jahresbetriebszeit der Wärmepumpe für das Gesamtsystem zu erhalten, muss der Zusatzwärmebedarf für das Warmwasser berechnet werden:

$$Q_{ww} = \frac{300 \text{ kg} \cdot (50 \text{ °C} - 10 \text{ °C}) \cdot 4,182 \text{ kJ/(kg·K)}}{3600} \cdot 365 = 5088 \text{ kWh}$$

Nach Gleichung 17 kann nun die Jahresbetriebszeit der Wärmepumpe für das Gesamtsystem berechnet werden:

$$t_{a,HP,tot} = 1824,8 \text{ h} + \frac{5088 \text{ kWh}}{10,5 \text{ kW}} = 2309,4 \text{ h}$$

Für dieses Beispiel ergibt sich eine deutlich höhere Jahresbetriebszeit als unter den Normbedingungen (siehe D.3.2), und die mit Gleichung 13 berechnete Normlänge muss entsprechend korrigiert werden. Aus den Figuren 11 bis 19 kann der Korrekturfaktor für die Jahresbetriebszeit herausgelesen werden.

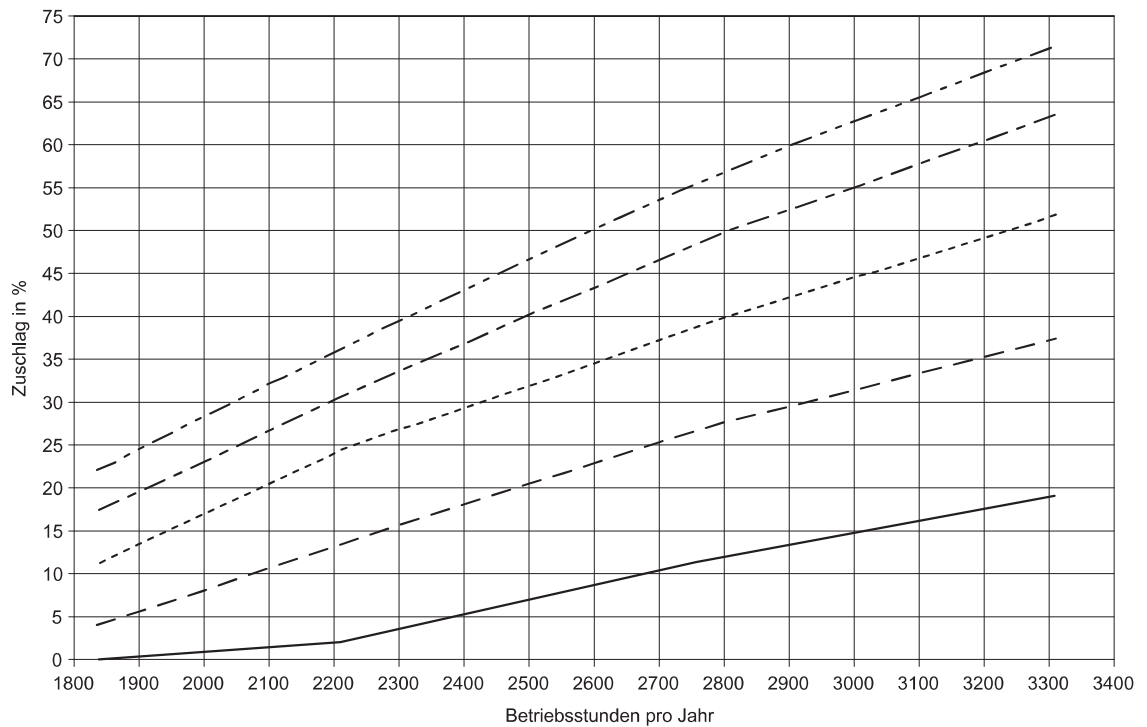
D.3.6 Korrekturfaktor Jahresbetriebszeit, Anordnung und Wärmeleitfähigkeit

Je nach Jahresbetriebszeit, Anordnung der Erdwärmesonden und der Wärmeleitfähigkeit aus Tabelle 6 muss ein Zuschlag für die EWS-Länge zur Normlänge aus D.3.2 oder D.3.3 gemacht werden. In den nachfolgenden Diagrammen werden Linienanordnungen bis maximal 4 EWS und ein Fall mit quadratischer 2 × 2 EWS-Anordnung dargestellt. Für den Einsatz der EWS zu Heizzwecken sollte der Abstand so gross wie möglich gewählt werden. In den folgenden Diagrammen wird der Zuschlag in Variation von Abstand und Wärmeleitfähigkeit dargestellt. Der Zuschlag ist wie folgt zu berücksichtigen:

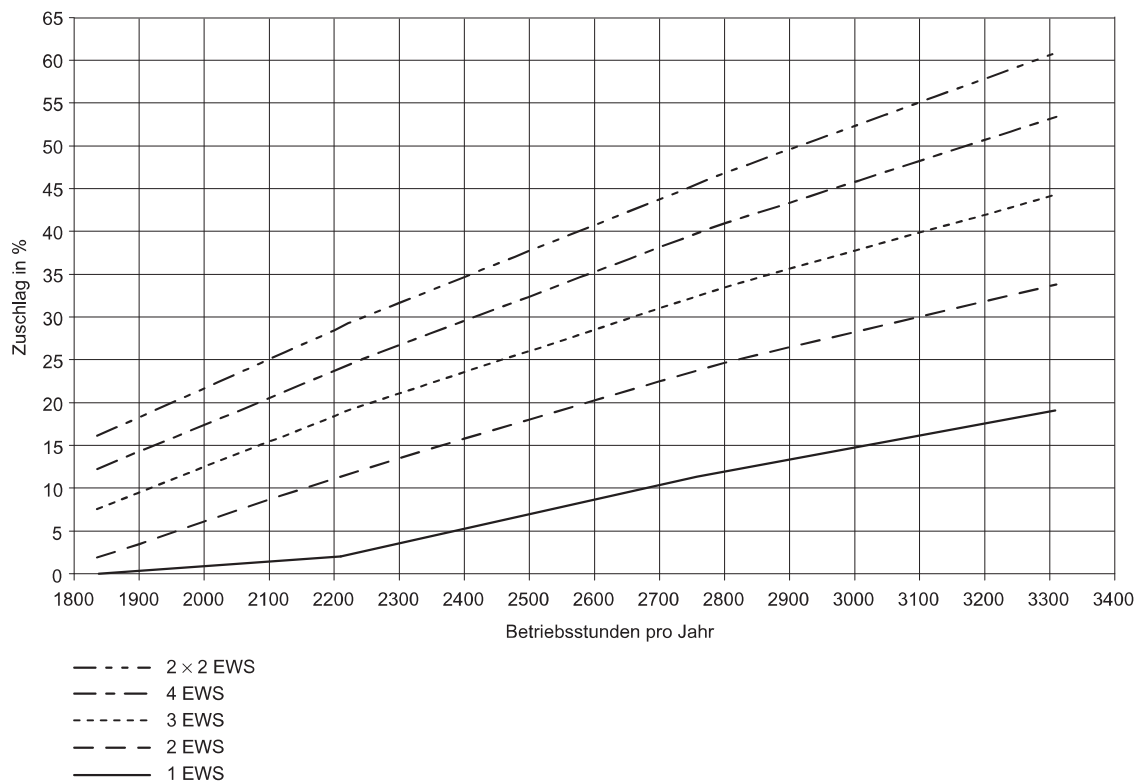
$$L_{BHE} = \frac{L_{BHE,N}}{\text{Anzahl Sonden}} \cdot (1 + \text{Zuschlag}) \quad (18)$$

L_{BHE} Länge der Erdwärmesonde bei Bedingungen am Standort, in m
 $L_{BHE,N}$ Normlänge der Erdwärmesonde bei Normbedingungen, in m

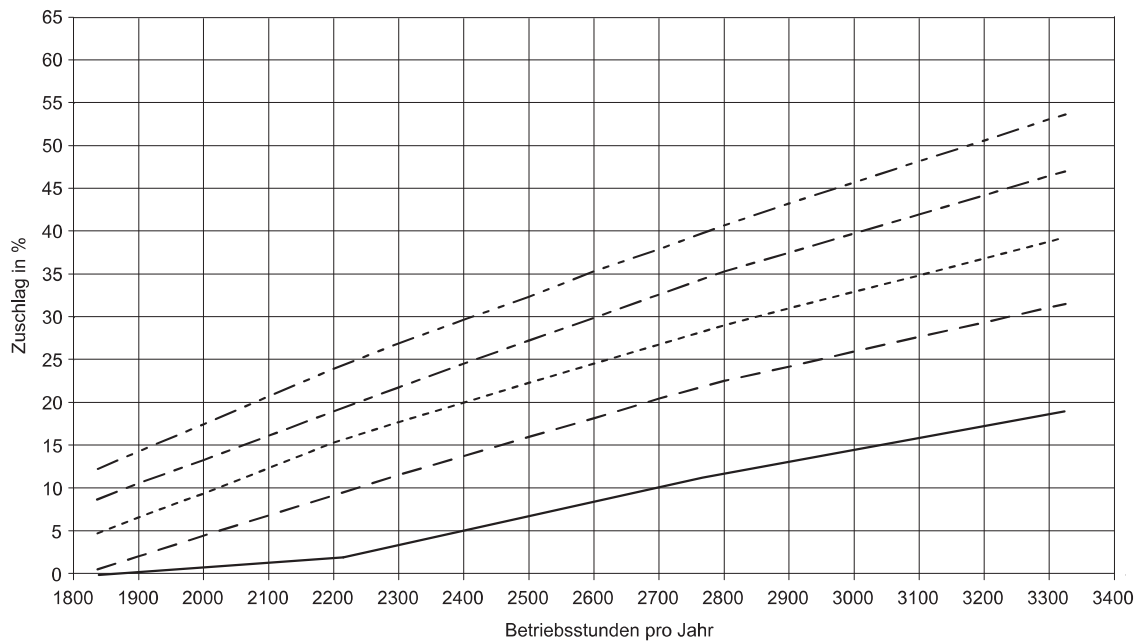
Figur 11 Zuschlag zur Erdwärmesondenlänge in Abhängigkeit der Betriebsstunden und Anordnung der EWS bei einer Wärmeleitfähigkeit von $2 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ und 5 m Abstand zwischen den Erdwärmesonden



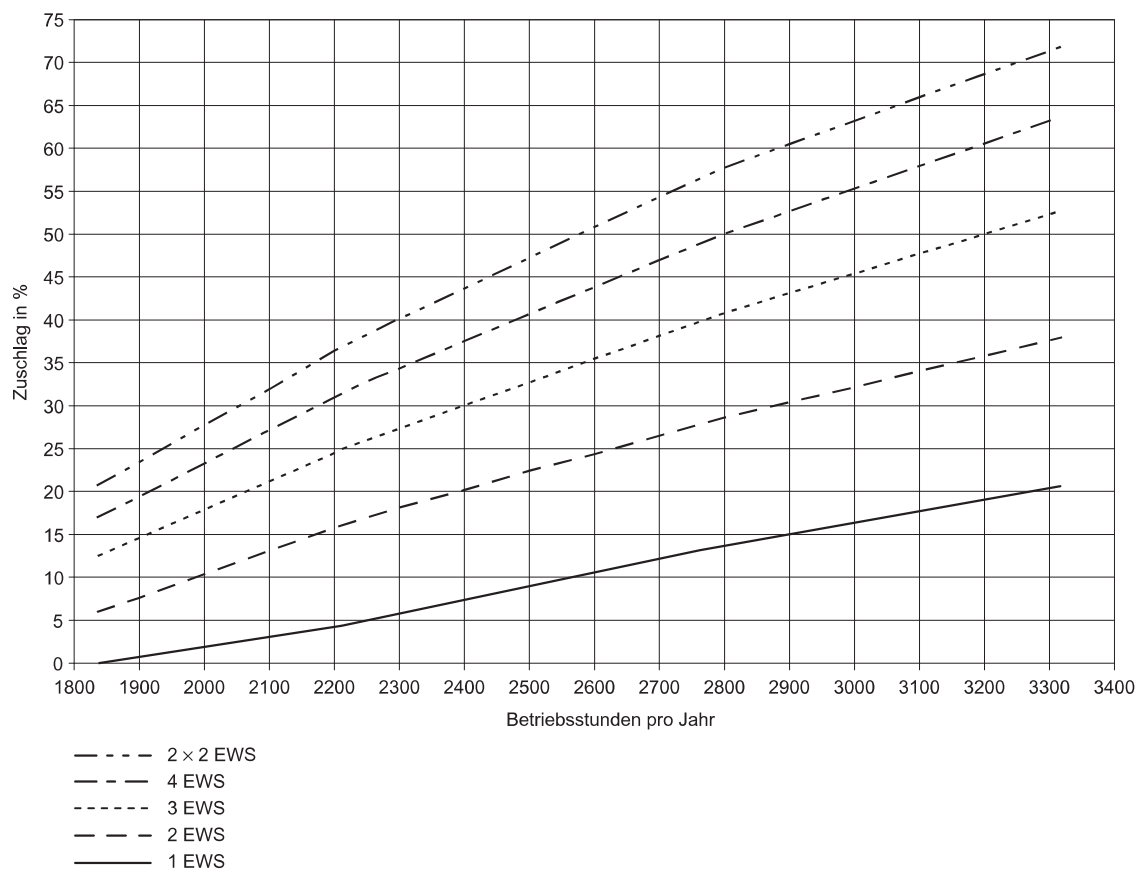
Figur 12 Zuschlag zur Erdwärmesondenlänge in Abhängigkeit der Betriebsstunden und Anordnung der EWS bei einer Wärmeleitfähigkeit von $2 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ und $7,5 \text{ m}$ Abstand zwischen den Erdwärmesonden



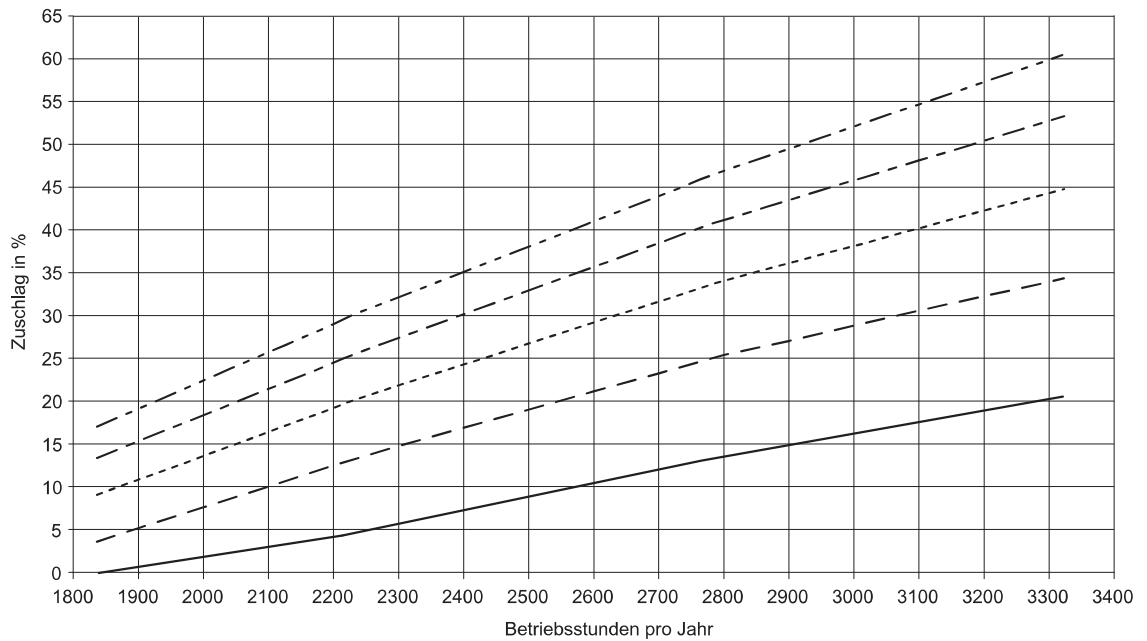
Figur 13 Zuschlag zur Erdwärmesondenlänge in Abhängigkeit der Betriebsstunden und Anordnung der EWS bei einer Wärmeleitfähigkeit von $2 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ und 10 m Abstand zwischen den Erdwärmesonden



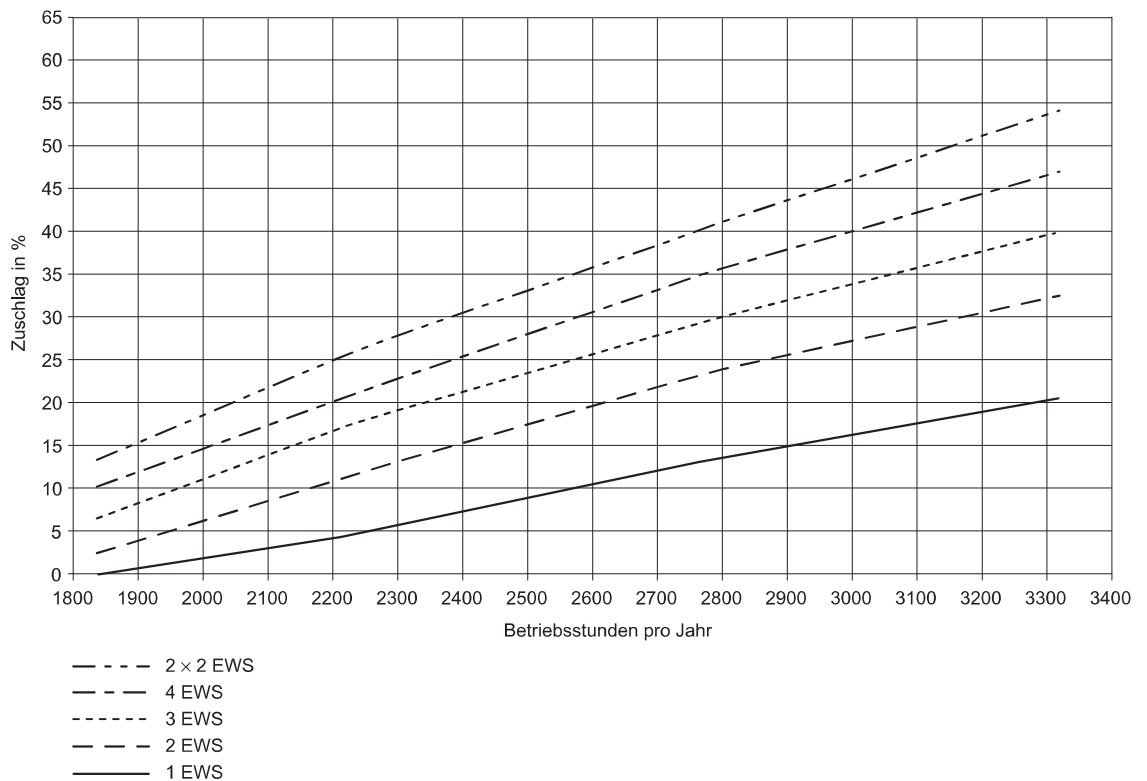
Figur 14 Zuschlag zur Erdwärmesondenlänge in Abhängigkeit der Betriebsstunden und Anordnung der EWS bei einer Wärmeleitfähigkeit von $2,5 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ und 5 m Abstand zwischen den Erdwärmesonden



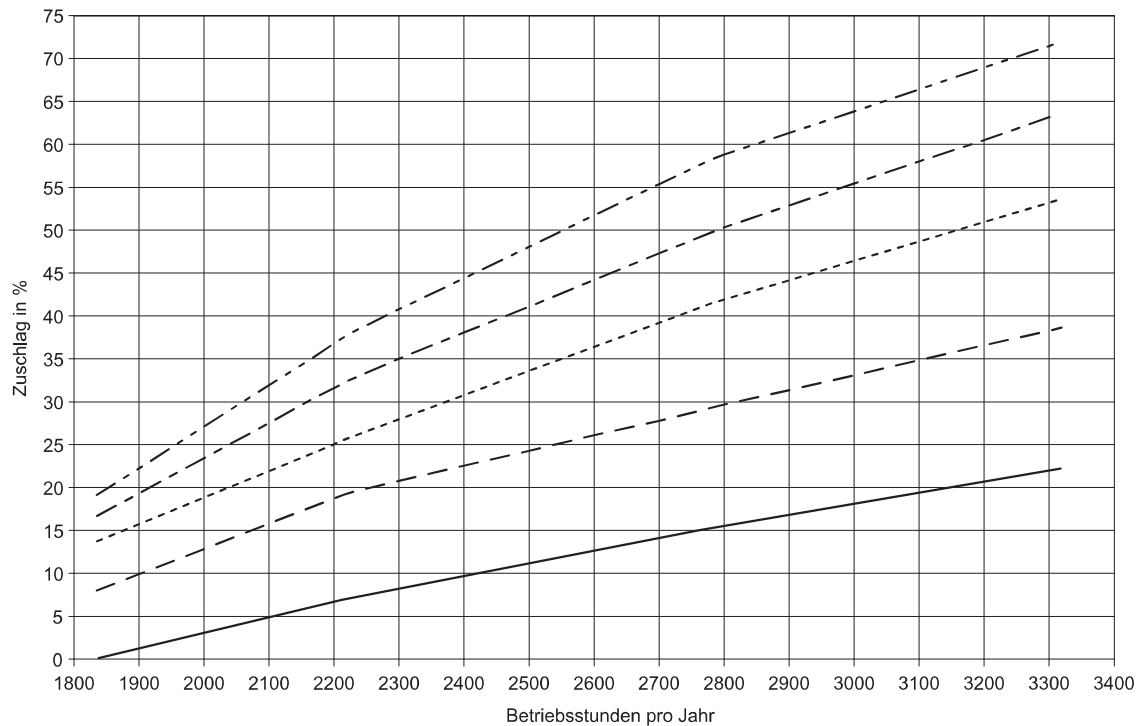
Figur 15 Zuschlag zur Erdwärmesondenlänge in Abhängigkeit der Betriebsstunden und Anordnung der EWS bei einer Wärmeleitfähigkeit von **2,5 W/(m-K)** und **7,5 m Abstand** zwischen den Erdwärmesonden



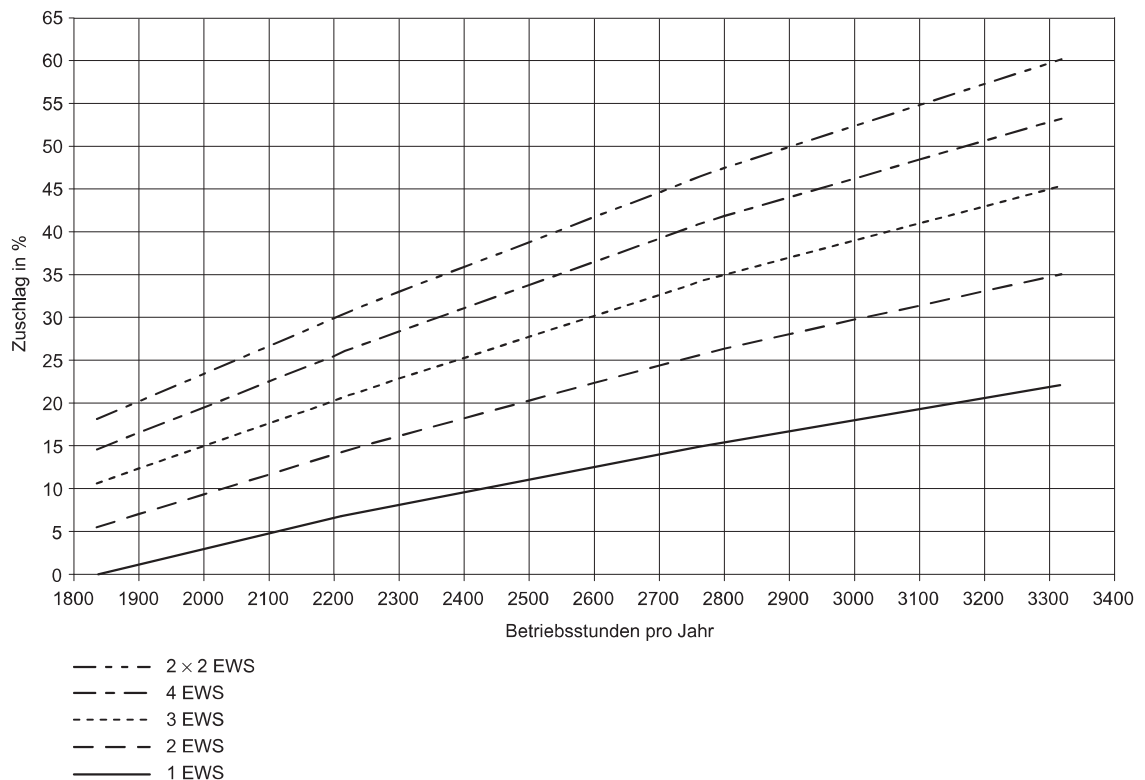
Figur 16 Zuschlag zur Erdwärmesondenlänge in Abhängigkeit der Betriebsstunden und Anordnung der EWS bei einer Wärmeleitfähigkeit von **2,5 W/(m-K)** und **10 m Abstand** zwischen den Erdwärmesonden



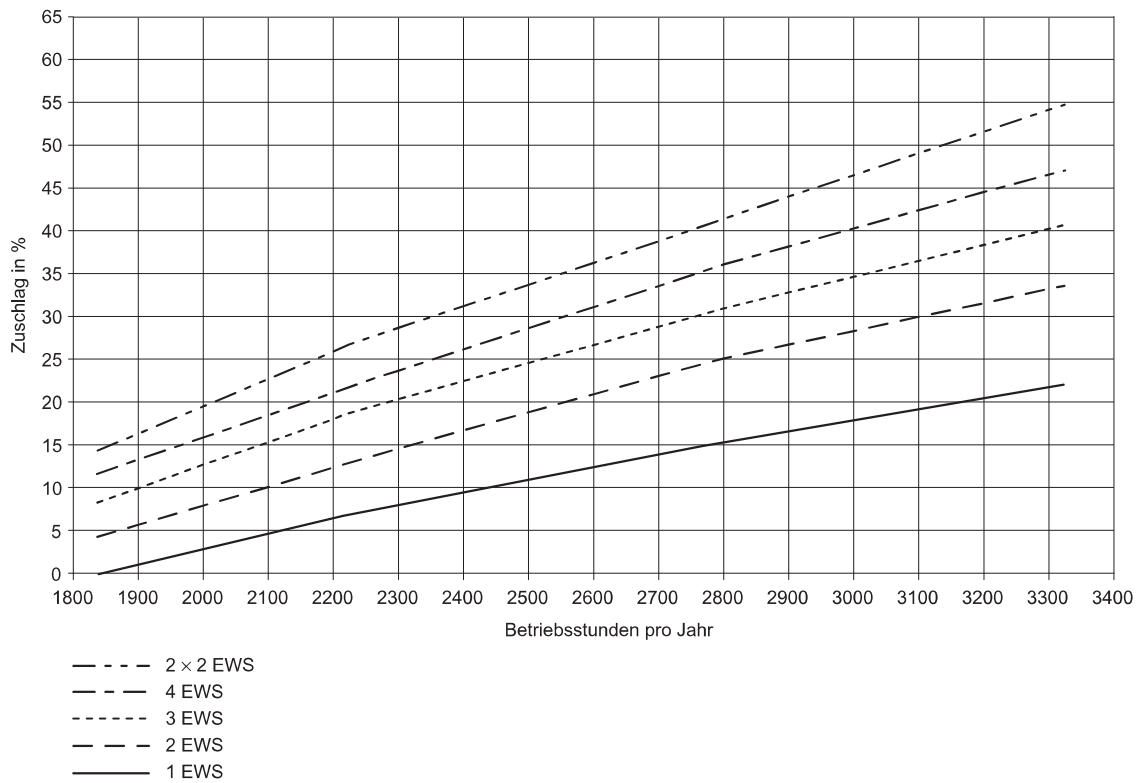
Figur 17 Zuschlag zur Erdwärmesondenlänge in Abhängigkeit der Betriebsstunden und Anordnung der EWS bei einer Wärmeleitfähigkeit von $3 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ und 5 m Abstand zwischen den Erdwärmesonden



Figur 18 Zuschlag zur Erdwärmesondenlänge in Abhängigkeit der Betriebsstunden und Anordnung der EWS bei einer Wärmeleitfähigkeit von $3 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ und $7,5 \text{ m}$ Abstand zwischen den Erdwärmesonden



Figur 19 Zuschlag zur Erdwärmesondenlänge in Abhängigkeit der Betriebsstunden und Anordnung der EWS bei einer Wärmeleitfähigkeit von $3 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ und 10 m Abstand zwischen den Erdwärmesonden



D.3.7 Korrekturfaktor Bodentemperatur

D.3.7.1 Die Auslegung einer Erdwärmesonden-Anlage erfolgt bei geeignetem Wärmeträgermedium auf eine Temperatur von minimal $-3/0^{\circ}\text{C}$, d.h. eine Wärmeträgermitteltemperatur von $-1,5^{\circ}\text{C}$ nach 50 Jahren (Auslegetemperatur EWS). Bei Wasser als Wärmeträger muss die Auslegetemperatur mit dem Wärmepumpen-Hersteller abgesprochen werden. Da die Entzugswerte von der anfänglichen Bodentemperatur abhängen, sind für die gleiche Entzugsleistung unterschiedliche Erdwärmesondenlängen nötig. Im Folgenden wird ein Verfahren zur Bestimmung der nötigen Erdwärmesondenlänge in Funktion der Bodentemperatur am Standort beschrieben.

In einem ersten Schritt wird die Bodentemperaturdifferenz gemäss Gleichung 19 bestimmt. Sie ist ein Mass für die entziehbare Energiemenge.

Die mittlere Bodentemperatur kann aus der Bodenoberflächentemperatur und dem Temperaturgradienten berechnet werden. Der Zusammenhang zwischen Bodenoberflächentemperatur und Standort ist in C.2 beschrieben. Die Bodentemperatur nimmt allgemein gemäss dem lokalen Temperaturgradienten mit der Tiefe zu. Der Temperaturgradient hängt von der Wärmeleitfähigkeit des Bodens, dem Wärmefluss und lokalen Einflüssen wie Grundwasserströmungen ab. Er beträgt im Mittelland ca. $0,03^{\circ}\text{C}/\text{m}$ und im Gebirge ca. $0,025^{\circ}\text{C}/\text{m}$.

D.3.7.2 Bodentemperaturdifferenz zwischen der mittleren Bodentemperatur entlang der EWS und der mittleren Wärmeträgertemperatur beim Auslegepunkt:

$$\Delta\theta_G = \theta_{G,s} + \frac{L_{BHE} \cdot \nabla\theta_G}{2} - \theta_{BHE,50} \quad (19)$$

$\Delta\theta_G$ Bodentemperaturdifferenz, in K
 $\theta_{G,s}$ Bodenoberflächentemperatur, in $^{\circ}\text{C}$
 L_{BHE} Länge der Erdwärmesonde, in m
 $\nabla\theta_G$ Temperaturgradient, in K/m
 $\theta_{BHE,50}$ Auslegetemperatur der EWS, in $^{\circ}\text{C}$

D.3.7.3 Aus der Bodentemperaturdifferenz lässt sich die EWS-Länge für die jeweilige Bodentemperatur gemäss Gleichung 20 bestimmen. In einem iterativen Verfahren wird das Resultat der Gleichung 20 erneut in Gleichung 19 eingesetzt und die Prozedur so lange wiederholt, bis sich die EWS-Länge gegenüber dem vorherigen Rechenschritt um nicht mehr als 5 m ändert.

Bestimmung der korrigierten EWS-Länge, basierend auf der Bodentemperaturdifferenz gemäss Gleichung 19:

$$L_{BHE} = \frac{L_{BHE,N} \cdot \Delta\theta_{G,N}}{\Delta\theta_G} \quad (20)$$

L_{BHE} Länge der Erdwärmesonde, in m
 $L_{BHE,N}$ Normlänge der Erdwärmesonde bei 10°C Bodentemperatur, Auslegung $-3/0^{\circ}\text{C}$, in m
 $\Delta\theta_{G,N}$ Bodentemperaturdifferenz unter Normbedingungen (z.B. $\theta_G = 10^{\circ}\text{C}$; $\theta_{EWS,50} = -1,5^{\circ}\text{C}$, ergibt 11,5 K)
 $\Delta\theta_G$ Bodentemperaturdifferenz, in K

D.3.7.4 Beispiel

Bestimmung der korrigierten EWS-Länge bei einer Bodenoberflächentemperatur 12°C , einem Temperaturgradienten von $0,03 \text{ K}/\text{m}$ und einer geplanten EWS-Länge von 200 m für eine Auslegetemperatur von $-3^{\circ}\text{C}/0^{\circ}\text{C}$.

Bestimmung der mittleren Bodentemperaturdifferenz gemäss Gleichung 19:

$$\Delta\theta_G = 12^{\circ}\text{C} + \frac{200 \text{ m} \cdot 0,03 \text{ K}/\text{m}}{2} - (-1,5) = 16,5 \text{ K}$$

Iterative Bestimmung der korrigierten EWS-Länge gemäss Gleichung 20.

1. Iteration:

$$L_{BHE} = \frac{200 \text{ m} \cdot 11,5 \text{ K}}{16,5 \text{ K}} = 139 \text{ m}$$

Die 2. Iteration ergibt 147,6 m:

$$\Delta\theta_G = 12^\circ\text{C} + \frac{139 \text{ m} \cdot 0,03 \text{ K/m}}{2} - (-1,5^\circ\text{C}) = 15,6 \text{ K} \quad L_{BHE} = \frac{200 \text{ m} \cdot 11,5 \text{ K}}{15,6 \text{ K}} = 147,6 \text{ m}$$

Die 3. Iteration ergibt 146,4 m.

Resultat: Es wird eine Länge von 150 m gewählt (Standardlänge des Herstellers).

D.3.8 **Berechnungsbeispiel: Dimensionierung einer Einzelerdwärmesonde nach dem vereinfachten Berechnungsverfahren**

Gegeben:

– Haus in Appenzell	780 m ü.M.
– Geologie	40 m sandig kiesige Moräne; 80 m Molasse (Sandstein, Konglomerat)
– Einschränkung Bewilligung	max. Bohrtiefe 120 m, da tiefer Gas angetroffen werden könnte
– Platzangebot	12 m × 5 m
– Norm-Heizlast nach SIA 384.201	10 kW
– Warmwasserbedarf Durchschnitt pro Tag	140 l (4 Personen à 35 l)
– Wärmepumpe	
Heizleistung nach EN 14511-1 (B0W35)	10,8 kW
Kälteleistung nach EN 14511-1 (B0W35)	8,4 kW
– Heizleistung bei B0W50 (Warmwasser)	10,2 kW
– Wärmeträger	20% Ethylenglykol

Gesucht:

– Tiefe und Anzahl der Erdwärmesonden

Lösung:

1) Bodentemperatur (Anhang C.2)

Bestimmung der Bodenoberflächentemperatur für den Heizfall auf der Alpennordseite gemäss Gleichung 2 in C.2.2:

$$\theta_{G,s} = 1,373 \cdot 10^{-6} \cdot H_S^2 - 7,03 \cdot 10^{-3} \cdot H_S + 12,5$$

$\theta_{G,s}$ Bodenoberflächentemperatur, in °C
 H_S Standorthöhe, m ü.M.

$$\theta_{G,s} = 1,373 \cdot 10^{-6} \cdot 780^2 - 7,03 \cdot 10^{-3} \cdot 780 + 12,5 = 7,9^\circ\text{C}$$

Sind Meteodaten [11] für den Standort vorhanden, kann die Bodenoberflächentemperatur nach Gleichung 7 in C.2.3 berechnet werden.

Meteodaten (für Appenzell, 780 m ü.M., Jahresmitteltemperatur 8,0°C)

$$\theta_{G,s} = \theta_{e,a,m} + 1,55$$

$$\theta_{G,s} = 8,0 + 1,55 = 9,55^\circ\text{C}$$

$\theta_{G,s}$ Bodenoberflächentemperatur, in °C
 $\theta_{e,a,m}$ mittlere Jahresausserlufttemperatur, in °C

Bodenoberflächentemperatur, mit Toleranzwert für den Heizfall:

$$\theta_{G,s,H} = \theta_{G,s} - 1 = 9,55 - 1 = 8,55^\circ\text{C}$$

Die Bodenoberflächentemperatur wird unter Schritt 8 für die Bestimmung des Korrekturfaktors für die Bodentemperatur am Standort benötigt. Es wird die genauere Bodenoberflächentemperatur aus den Meteodaten verwendet (8,55°C).

2) Boden- und Stoffkennwerte (C.3)

Die Wärmeleitfähigkeit und die Wärmekapazität werden als gewichteter Durchschnitt berechnet.

Mächtigkeit	Gesteinstyp	empfohlener Rechenwert	
		Wärmeleitfähigkeit λ	spez. Wärmekapazität ρ_c
40 m	Moräne fest gelagert	1,8 W/(m·K)	2 MJ/(m ³ ·K)
50 m	Feinsandstein	2,9 W/(m·K)	2,1 MJ/(m ³ ·K)
30 m	Grobsandstein und Konglomerat	2,7 W/(m·K)	2,1 MJ/(m ³ ·K)
Total 120 m		2,48 W/(m·K)	2,07 MJ/(m ³ ·K)

3) Spezifische Leistung der Erdwärmesonde und Normlänge (D.3.2)

Ohne festgelegten Sondendurchmesser wird Figur 7 für Erdwärmesonden mit Durchmesser 32 mm verwendet. Die spezifische Leistung einer Erdwärmesonde mit Durchmesser 32 mm bei einer Wärmeleitfähigkeit von 2,48 W/m·K und einer Wärmekapazität von 2,07 MJ/(m³·K) beträgt 37,5 W/m.

Mit der Normleistung kann die Normlänge der Erdwärmesonde bestimmt werden. Für die Auslegung der Erdwärmesonde ist die Kälteleistung der Wärmepumpe massgebend. Sie beträgt 8,4 kW; damit ergibt sich eine Sondenlänge von

$$L_{BHE} = \frac{8400 \text{ W}}{37,5 \text{ W/m}} = 224 \text{ m}$$

4) Jahresbetriebszeit Heizung (D.3.5)

Die Jahresbetriebszeit für die Heizung wird nach Gleichung 15 bestimmt.

$$t_{a,H} = \frac{t_{a,N} \cdot \Phi_{HL}}{\Phi_{HP,c}} = \frac{1900 \cdot 10}{10,8} = 1759 \text{ h}$$

$t_{a,h}$ Jahresbetriebszeit Heizung, in h

$t_{a,N}$ Norm-Jahresbetriebszeit, in h, nach Figur 10 bei 780 m ü.M. → 1900 h

Φ_{HL} Norm-Heizlast, in kW

$\Phi_{HP,c}$ Heizleistung der WP im Auslegepunkt, in kW

5) Jahreswärmebedarf Warmwasser (D.3.5.3)

Der Jahreswärmebedarf für Warmwasser wird nach Gleichung 16 bestimmt.

$$Q_{ww} = \frac{M_{ww} \cdot (\theta_{ww} - \theta_w) \cdot c_w}{3600} \cdot 365 = \frac{140 \text{ kg} \cdot (50^\circ\text{C} - 10^\circ\text{C}) \cdot 4,182 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})}{3600} \cdot 365 = 2374 \text{ kWh}$$

Q_{ww} Jahreswärmebedarf Warmwasser, in kWh

M_{ww} Warmwasserbedarf pro Tag, in kg

θ_{ww} Warmwassertemperatur, in °C

θ_w Kaltwassertemperatur, in °C

c_w spez. Wärmekapazität Wasser, in kJ/(kg·K)

6) Jahresbetriebszeit für Gesamtsystem (D.3.5.4)

Mit den Zwischenergebnissen aus 4) und 5) kann die Jahresbetriebszeit der Wärmepumpe für das Gesamtsystem nach Gleichung 17 bestimmt werden:

$$t_{a,HP,tot} = t_{a,H} + \frac{Q_e}{\Phi_{HP,e,ww}} = 1759 \text{ h} + \frac{2374 \text{ kWh}}{10,2 \text{ kW}} = 1992 \text{ h}$$

$t_{a,HP,tot}$ Jahresbetriebszeit WP für Gesamtsystem, in h

$t_{a,H}$ Jahresbetriebszeit Heizung, in h

Q_e Zusatzwärmebedarf, in kWh

$\Phi_{HP,e,ww}$ Heizleistung der WP für Zusatzwärmebedarf WW (B0W50), in kW

7) Korrekturfaktor Jahresbetriebszeit, Anordnung und Wärmeleitfähigkeit (D.3.6)

Die Bohrlänge ist von der Bewilligung her auf 120 m beschränkt. Somit müssen mindestens 2 Erdwärmesonden gebohrt werden. Der Platz reicht für 2 Sonden mit einem Abstand von 10 m oder 3 Sonden mit einem Abstand von 5 m.

Variante 1: Bei 2 Erdwärmesonden mit 10 m Abstand beträgt die Korrektur nach Figur 16 bei 1992 h Jahresbetriebszeit 6%. Die Erdwärmesondenlänge wird damit vorläufig wie folgt bestimmt.

$$L_{BHE, 2 \text{ Stück}} = \frac{224 \text{ m}}{2} \cdot (1 + 0,06) = 118,7 \text{ m}$$

Variante 2: Bei 3 Erdwärmesonden mit 5 m Abstand beträgt die Korrektur nach Figur 14 bei 1992 h Jahresbetriebszeit 17%.

$$L_{BHE, 3 \text{ Stück}} = \frac{224 \text{ m}}{3} \cdot (1 + 0,17) = 87,4 \text{ m}$$

8) Korrekturfaktor Bodentemperatur (D.3.7)

Abschliessend ist die Erdwärmesondenlänge noch bezüglich der Bodentemperatur am Standort zu korrigieren. Mit dem in D.3.7 beschriebenen iterativen Verfahren wird die korrigierte EWS-Länge aufgrund der Bodentemperatur am Sondenstandort berechnet.

Bestimmung der mittleren Bodentemperaturdifferenz anhand der Gleichung 19 und Korrektur der EWS-Länge gemäss Gleichung 20.

Variante 1: Bei 2 Erdwärmesonden ist die mittlere Bodentemperaturdifferenz

$$\Delta\theta_G = 8,55 \text{ °C} + \frac{118,7 \text{ m} \cdot 0,03 \text{ K/m}}{2} - (-1,5 \text{ °C}) = 11,8 \text{ K}$$

Daraus ergibt sich eine Länge von je:

$$L_{BHE} = \frac{118,7 \text{ m} \cdot 11,5}{11,8} = 115,4 \text{ m}$$

Variante 2: Bei 3 Erdwärmesonden ist die mittlere Bodentemperaturdifferenz

$$\Delta\theta_G = 8,55 \text{ °C} + \frac{87,4 \text{ m} \cdot 0,03 \text{ K/m}}{2} - (-1,5 \text{ °C}) = 11,4 \text{ K}$$

Daraus ergibt sich eine Länge von je:

$$L_{BHE} = \frac{87,4 \text{ m} \cdot 11,5}{11,4} = 88,2 \text{ m}$$

Eine Iteration kann bei beiden Varianten entfallen, da die Längenkorrektur kleiner als 5 m ist. Mit beiden Varianten sind die Bewilligungsaufgaben erfüllt.

9) Druckverlust

Die Druckverlustberechnung dieses Beispiels ist in D.5.2 enthalten.

10) Installation

Beide Erdwärmesondenvarianten haben einen kleinen bis sehr kleinen Druckverlust. Auf den Stromverbrauch der Umwälzpumpe hat der Unterschied einen geringen Einfluss. Aus wirtschaftlicher Sicht würde in diesem Beispiel die Variante mit den 2 Erdwärmesonden gewählt.

D.4 Berechnungsverfahren für komplexe Anlagen

Das Vorgehen ist in 3.2.4 beschrieben. Für die Berechnung stehen verschiedene Programme zur Verfügung. Einige sind in G.3 aufgeführt.

D.5 Druckverlustberechnung

D.5.1 Berechnungsgrundlagen für Duplex-Erdwärmesonden

D.5.1.1 In den folgenden Figuren ist der Druckverlust pro Meter Duplex-Erdwärmesonde und pro Meter Zuleitung dargestellt. Für andere Ausführungen von Erdwärmesonden sollen Herstellerdaten verwendet werden.

Bei den Erdwärmesonden ist der Durchfluss für beide Kreise auf der X-Achse angegeben. Der Druckverlust berechnet sich wie folgt:

- Druckverlust Erdwärmesonde = Länge der EWS × Druckverlust pro Meter
- Druckverlust Zuleitung = Länge des Rohres (Vor- und Rücklauf addieren) × Druckverlust pro Meter

Bei der Erdwärmesonde wird die Länge als Länge der Sonde verstanden und nicht als Gesamtlänge der Rohre.

In den Erdwärmesondenrohren sollte eine turbulente Strömung angestrebt werden, um einen guten Wärmeübergang zu erhalten. Laminare Strömung ergibt einen um ca. 1,5 K kälteren Wärmeträger, was einen ca. 4,5% grösseren Stromverbrauch des Kompressors nach sich zieht. In den nachfolgenden Diagrammen ist nebst dem Druckverlust auch die hydraulische Leistung pro Meter angezeigt. Umwälzpumpen haben einen Wirkungsgrad von ca. 15% bis 65%, d.h., die effektive Pumpenleistung für die Erdwärmesonde (ohne horizontale Leitungen, Armaturen und Wärmepumpe) berechnet sich wie folgt:

$$P_{el} = \frac{L_{BHE} \cdot P_{hy,sp}}{\eta_{PU}} \quad (21)$$

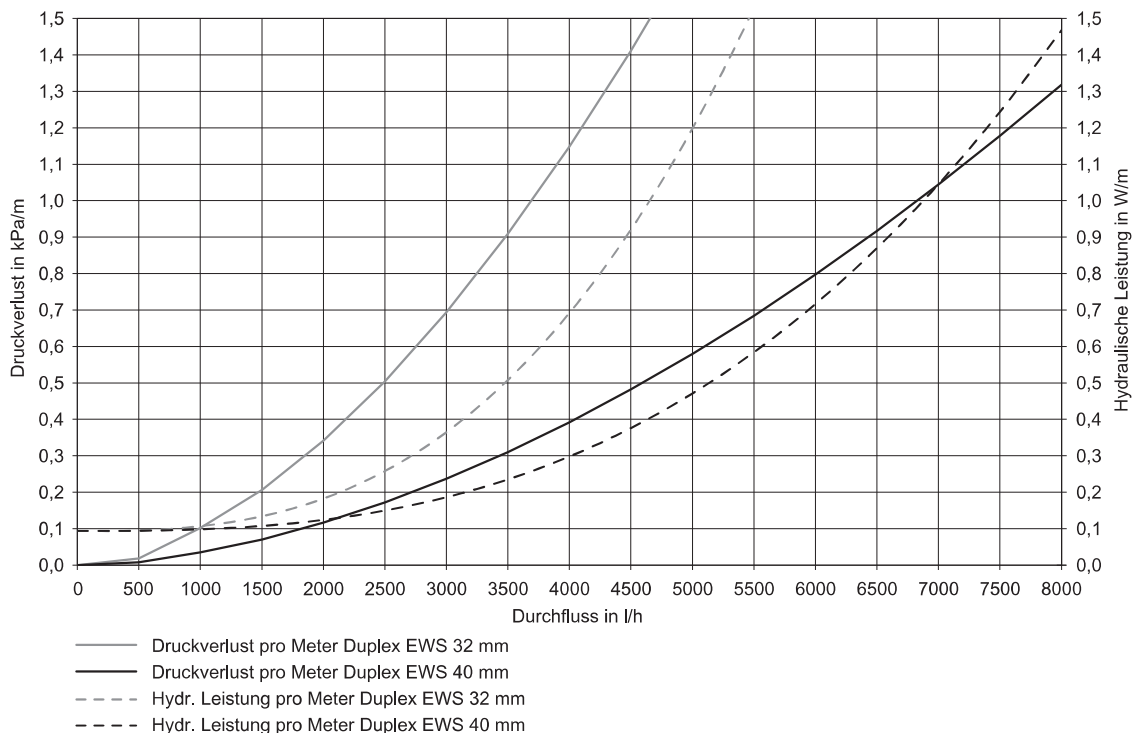
P_{el} Pumpenleistung (elektrische Aufnahme), in W

L_{BHE} Länge der EWS (Distanz von Kopf bis Fuss), in m

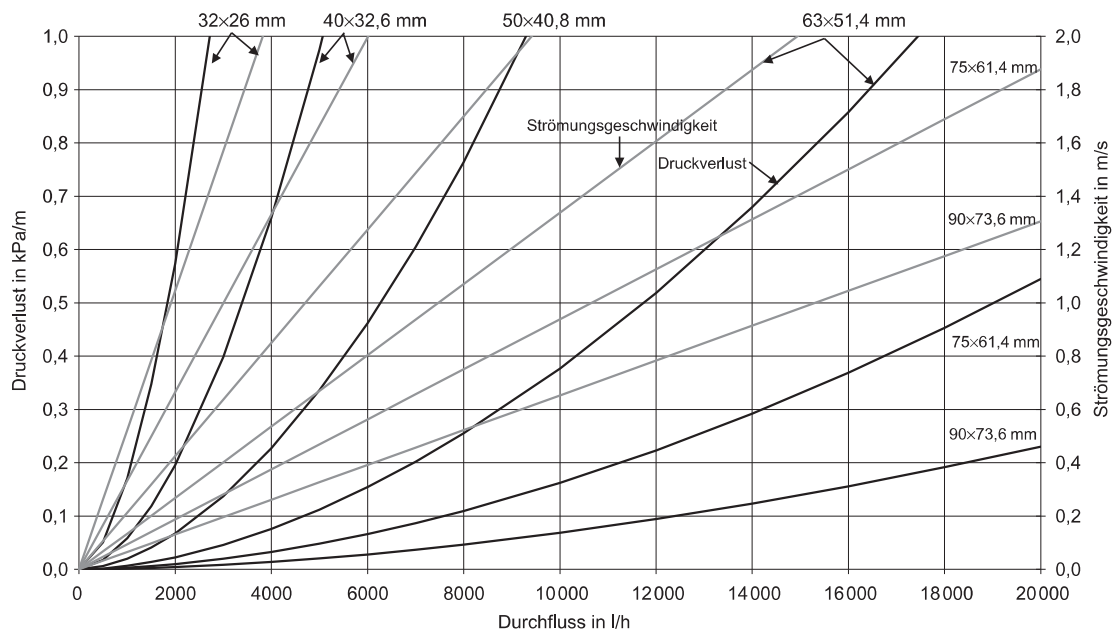
$P_{hy,sp}$ spezifische hydraulische Leistung pro Meter EWS, in W/m

η_{PU} Wirkungsgrad Umwälzpumpe (hydraulische Leistung zu elektrischer Aufnahmeleistung)

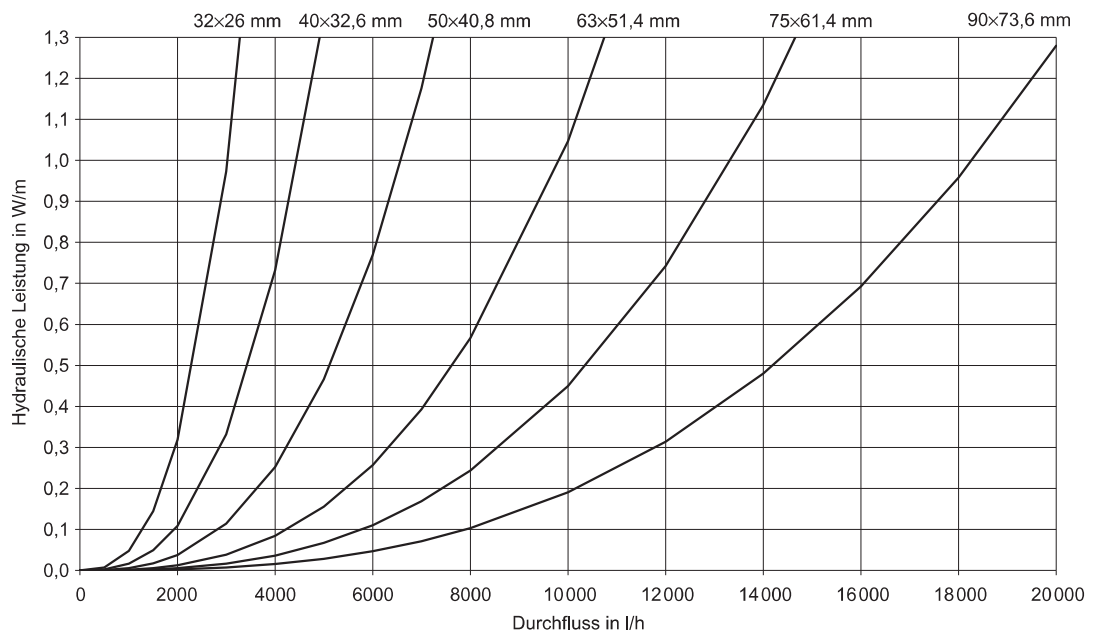
Figur 20 Druckverlust und hydraulische Leistung pro Meter EWS bei **Wasser 5 °C**



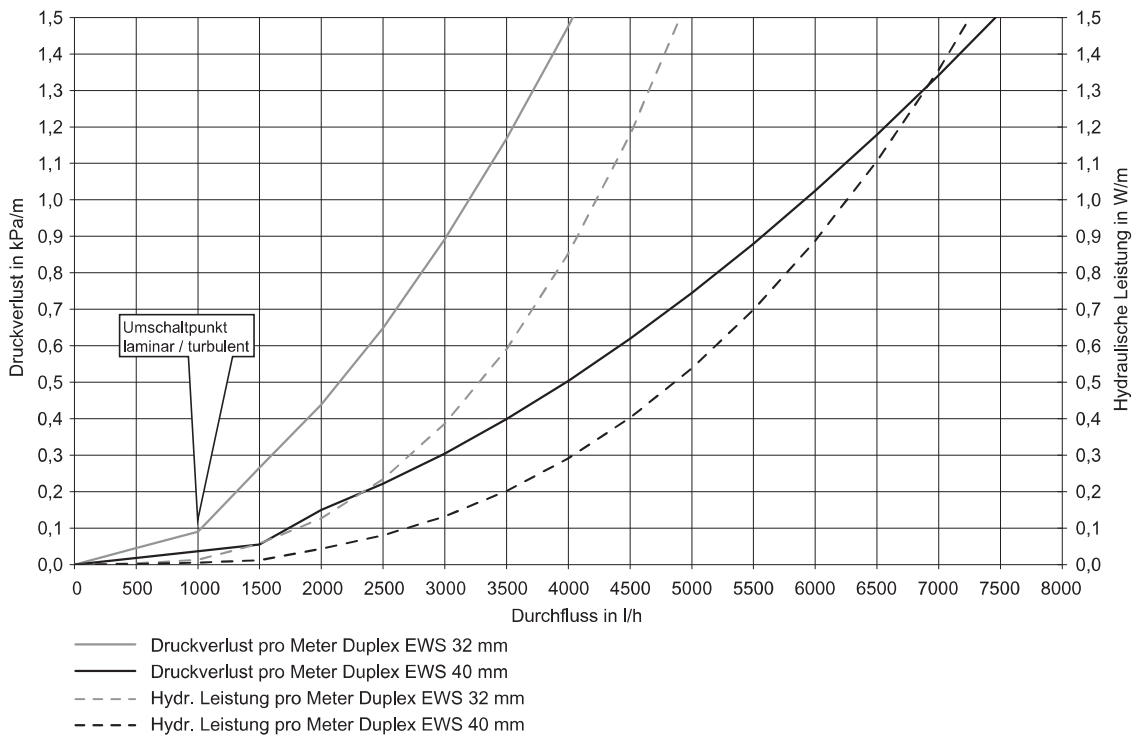
Figur 21 Druckverlust pro Meter Zuleitung PE-Rohr SDR 11 bei **Wasser 5°C**
(Viskosität 1,5 mm²/s, 1000 kg/m³)



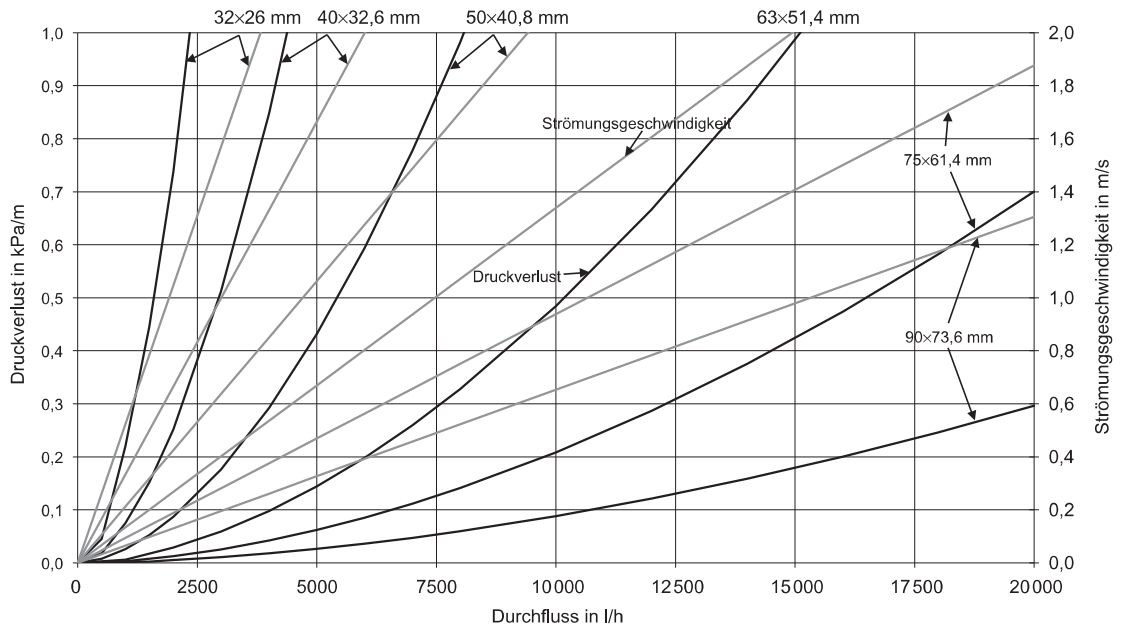
Figur 22 Hydraulische Leistung pro Meter Zuleitung PE-Rohr SDR 11 bei **Wasser 5°C**
(Viskosität 1,5 mm²/s, 1000 kg/m³)



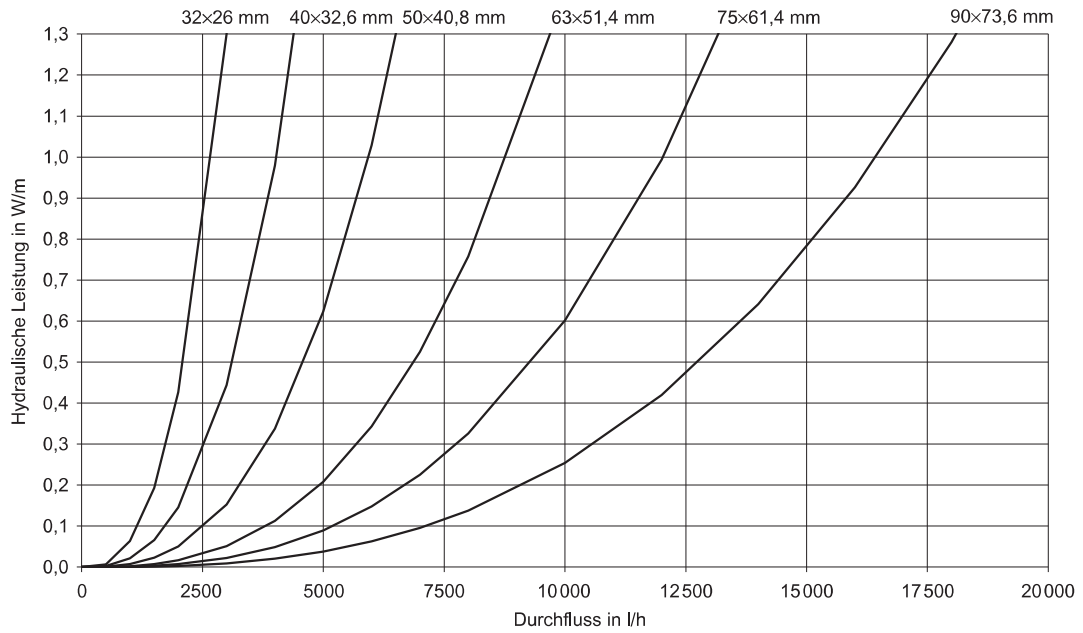
Figur 23 Druckverlust und hydraulische Leistung pro Meter EWS bei **Ethylenglykolgemisch 20%** bei 0 °C (Viskosität 3,5 mm²/s, 1040 kg/m³)



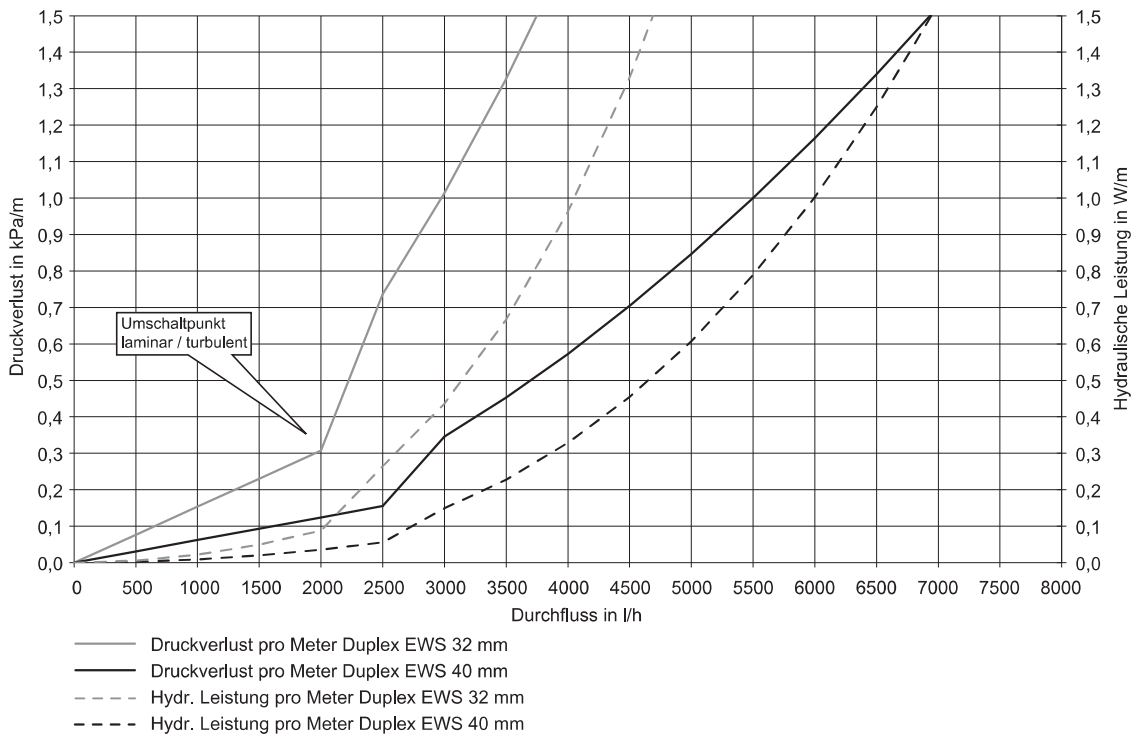
Figur 24 Druckverlust pro Meter Zuleitung PE-Rohr SDR 11 bei **Ethylenglykolgemisch 20%** bei 0 °C (Viskosität 3,5 mm²/s, 1040 kg/m³)



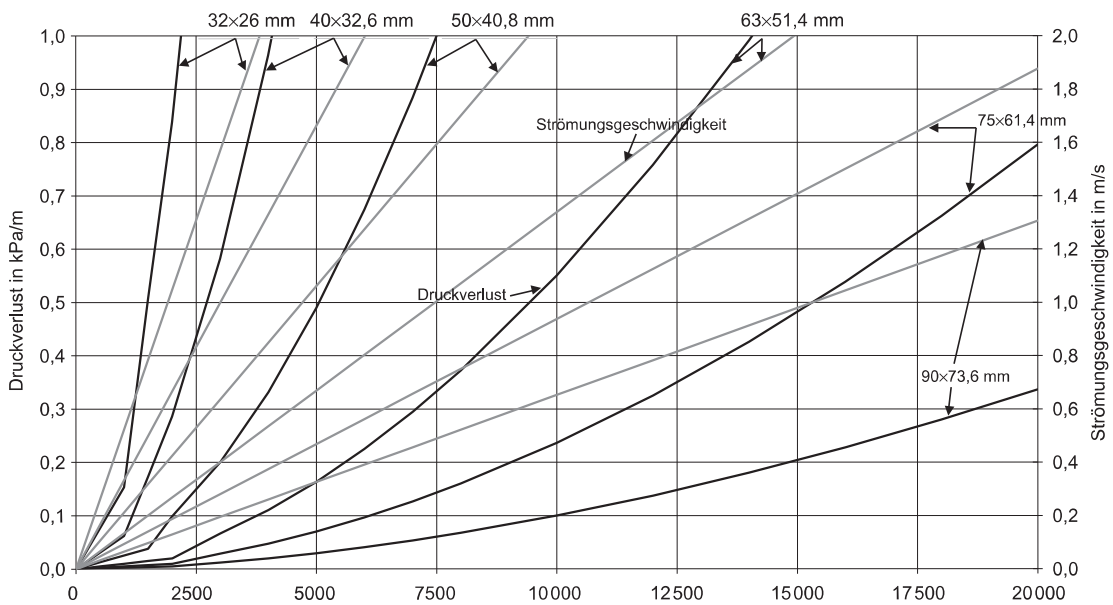
Figur 25 Hydraulische Leistung pro Meter Zuleitung PE-Rohr SDR 11 bei **Ethylenglykolgemisch 20%** bei 0 °C (Viskosität 3,5 mm²/s; 1040 kg/m³)



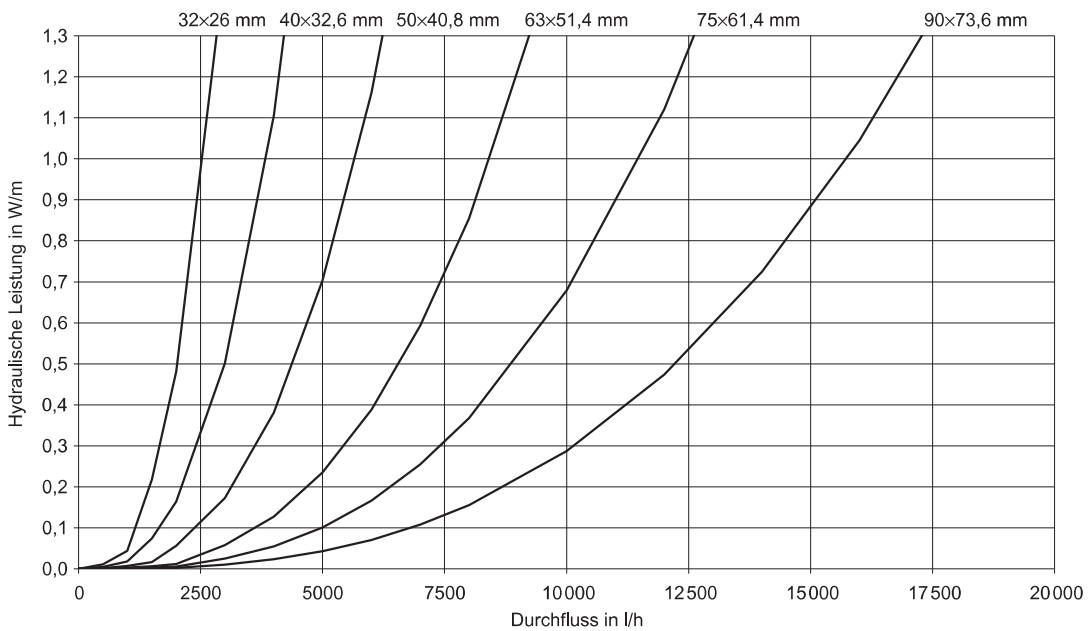
Figur 26 Druckverlust und hydraulische Leistung pro Meter EWS bei **Propylenglykolgemisch 25%** bei 0 °C (Viskosität 6,0 mm²/s; 1033 kg/m³)



Figur 27 Druckverlust pro Meter Zuleitung PE-Rohr SDR 11 bei **Propylenglykolgemisch 25%** bei 0 °C (Viskosität 6,0 mm²/s, 1033 kg/m³)



Figur 28 Hydraulische Leistung pro Meter Zuleitung PE-Rohr SDR 11 bei **Propylenglykolgemisch 25%** bei 0 °C (Viskosität 6,0 mm²/s, 1033 kg/m³)



D.5.1.2 Auf einen Einbau von Drosselorganen soll verzichtet werden, wenn der Längenunterschied der Erdwärmesonden zwischen der kürzesten und der längsten Erdwärmesonde weniger als 15% oder die Differenz der Zuleitungslängen weniger als 50% der Sondenlänge beträgt.

Bei einer Kombination unterschiedlicher Erdwärmesonden- und Zuleitungslängen gelten folgende Einschränkungen: Die Summe aus den relativen Zuleitungslängenunterschieden (in Prozent) und die mit 3 multiplizierten relativen Unterschiede der EWS-Längen (in Prozent) darf 50% nicht überschreiten. Damit wird gewährleistet, dass die Durchflussmenge pro Sonde im Vergleich zum Sollwert nicht mehr als 15% abweicht, was zulässig ist. Ein erhöhter Durchfluss hat eine minimale Leistungssteigerung zur Folge, ein verminderter Durchfluss entsprechend eine kleine Leistungseinbuße. Von der ±15%-Regel kann abgewichen werden, wenn die hydraulisch bedingte Leistungsänderung der EWS berücksichtigt wird (siehe D.3.4).

In den folgenden Beispielen wird von einer Temperaturdifferenz von 3 K zwischen Ein- und Austritt der Wärmepumpe ausgegangen und die effektiven Verhältnisse pro Erdwärmesonde berechnet.

Beispiel 1 Druckverlust bei unterschiedlichen Zuleitungslängen: 4 Erdwärmesonden à 100 m Länge, Ø 32 mm, mit Zuleitung 40 mm (Y-Formstück), Wärmeträger 20% Ethylenglykol bei 0 °C. Zuleitungsdifferenz 50 m, d.h. 50% der EWS-Länge.

Tiefe	Zuleitung (Weg)	Durchfluss EWS-Kreis	Zuleitung	EWS	Druckverlust Zuleitung	Total	Durchfluss-änderung	Temperaturdifferenz nominal
m	m	l/h	l/h	kPa	kPa	kPa	%	K
100	5	758,55	1517,09	27,03	1,55	28,58	114,71	2,65
100	21,7	689,75	1379,50	22,89	3,39	28,58	104,31	2,91
100	38,3	635,77	1271,54	19,85	8,74	28,58	96,15	3,16
100	55	592,01	1184,03	17,52	11,07	28,58	89,53	3,39

Beispiel 2 Druckverlust bei unterschiedlichen EWS-Längen: 4 Erdwärmesonden à 92 bis 108 m Länge, Ø 32 mm, mit Zuleitung 40 mm (Y-Formstück), Wärmeträger 20% Ethylenglykol 20% bei 0 °C. Differenz der EWS 16 m, d.h. 16% der durchschnittlichen EWS-Länge.

Tiefe	Zuleitung (Weg)	Durchfluss EWS-Kreis	Zuleitung	EWS	Druckverlust Zuleitung	Total	Durchfluss-änderung	Temperaturdifferenz nominal
m	m	l/h	l/h	kPa	kPa	kPa	%	K
92	10	693,19	1386,38	21,24	2,65	23,89	113,95	2,65
97	10	674,75	1349,50	21,36	2,53	23,89	105,20	2,87
103	10	654,31	1308,62	21,50	2,40	23,89	96,07	3,14
108	10	638,52	1277,04	21,60	2,30	23,89	89,41	3,38

Beispiel 3 Druckverlust bei unterschiedlichen Zuleitungs- und EWS-Längen: 4 Erdwärmesonden à 95 bis 105 m Länge, Ø 32 mm, mit Zuleitung 40 mm (Y-Formstück), Wärmeträger 20% Ethylenglykol bei 0 °C. Differenz der EWS 10 m, d.h. 10% der EWS-Länge × 3, d.h. 30%. Differenz der Zuleitungen 20 m, d.h. 20%; Total 30% + 20% = 50%.

Tiefe	Zuleitung (Weg)	Durchfluss EWS-Kreis	Zuleitung	EWS	Druckverlust Zuleitung	Total	Durchfluss-änderung	Temperaturdifferenz nominal
m	m	l/h	l/h	kPa	kPa	kPa	%	K
95	10	720,68	1441,35	23,48	2,84	26,32	114,72	2,64
100	16,7	675,88	1351,76	22,09	4,23	26,32	102,21	2,96
100	23,3	652,25	1304,49	20,76	5,56	26,32	98,64	3,07
105	30	617,73	1235,46	19,82	6,50	26,32	88,97	3,40

D.5.2 **Rechenbeispiel: Druckverlustberechnung einer Einzelerdwärmesonde basierend auf dem Beispiel in D.3.7**

Gegeben:

Wärmepumpe

- Heizleistung: 10,8 kW
- Kälteleistung: 8,4 kW nach EN 14511-1 (B0W35)
- Wärmeträger: 20% Ethylenglykol

Gesucht:

- Druckverlust der Erdwärmesonden: Variante 1: 115,4 m, handelsüblich 120 m, Ø 32 mm; Variante 2: 88,2 m, handelsüblich 90 m, Ø 32 mm

D.5.2.1 Variante 1: Druckverlust bei 2 Erdwärmesonden à 120 m

Die Wärmepumpe hat eine Kälteleistung von 8400 W. Für eine Differenz von 3 K zwischen Ein- und Austrittstemperatur beim Verdampfer ergibt sich ein Durchfluss von 2500 l/h (c_p Frostschutz 4040 J/kg·K). Bei 2 Erdwärmesonden ergibt dies einen Durchfluss pro Erdwärmesonde von 1250 l/h. Nach Figur 23 berechnet sich ein Druckverlust von 0,19 kPa/m und damit bei handelsüblichen 120 m EWS:

$$\text{Druckverlust} = 120 \cdot 0,19 \text{ kPa/m} = 22,8 \text{ kPa}$$

Die Strömung ist turbulent. Die Erdwärmesondenlänge muss nicht korrigiert werden.

Der Druckverlust für die Zuleitung \varnothing 40 mm wird gemäss Figur 24 bestimmt und beträgt 0,11 kPa/m.

Erdwärmesonde	Zuleitungslänge (einfache Länge)	Durchfluss	Druckverlust
1	15 m	1250 l/h	3,3 kPa
2	5 m	1250 l/h	1,1 kPa
Maximum			3,3 kPa

Der Gesamtdruckverlust der Erdwärmesonden bis zum Verteiler beträgt im Maximum:

$$\text{Gesamtdruckverlust} = (120 \text{ m} \cdot 0,19 \text{ kPa/m}) + 3,3 \text{ kPa} = 26,1 \text{ kPa}$$

Nach D.5.1.2 soll auf Drosselorgane verzichtet werden.

D.5.2.2 Variante 2: Druckverlust bei 3 Erdwärmesonden à 85 m

Bei 3 Erdwärmesonden ergibt sich ein Durchfluss pro Erdwärmesonde von 833 l/h. Nach Figur 23 ergibt dies einen Druckverlust von 0,08 kPa/m, und der Druckverlust der EWS ist:

$$\text{Druckverlust} = 90 \text{ m} \cdot 0,08 \text{ kPa/m} = 7,2 \text{ kPa}$$

Die Strömung ist laminar. Die Erdwärmesondentemperatur wird dadurch 1,5 K tiefer sein als berechnet und entsprechend auch die Bodentemperaturdifferenz (siehe D.3.7). Dies hat zur Folge, dass der Korrekturfaktor für die Bodentemperatur angepasst werden muss. Gemäss Gleichung 20 in D.3.7.3 beträgt die korrigierte EWS-Länge:

$$L_{BHE} = \frac{88,2 \text{ m} \cdot 11,5}{11,4 - 1,5} = 102,5 \text{ m}$$

Der Druckverlust für die Zuleitung \varnothing 40 mm wird gemäss Figur 24 bestimmt und beträgt 0,054 kPa/m.

Erdwärmesonde	Zuleitungslänge (einfache Länge)	Durchfluss	Druckverlust
1	15 m	833 l/h	1,62 kPa
2	10 m	833 l/h	1,08 kPa
3	5 m	833 l/h	0,54 kPa
Maximum			1,62 kPa

Der Gesamtdruckverlust der Erdwärmesonden bis zum Verteiler beträgt im Maximum:

$$\text{Gesamtdruckverlust} = (102,5 \text{ m} \cdot 0,08 \text{ kPa/m}) + 1,62 \text{ kPa} = 9,8 \text{ kPa}$$

Dies ist ein sehr tiefer Wert. Üblich sind Druckverluste von 40 bis 100 kPa. Nach D.5.1.2 soll auf Drosselorgane verzichtet werden.

D.5.2.3 Installation

Beide Erdwärmesondenvarianten haben einen kleinen bis sehr kleinen Druckverlust. Auf den Stromverbrauch der Umwälzpumpe hat der Unterschied einen geringen Einfluss. Aus wirtschaftlicher Sicht würde in diesem Beispiel die Variante mit den 2 Erdwärmesonden gewählt.

Anhang E (normativ)

Ausrüstung der Bohrunternehmung

E.1 Allgemeines

- E.1.1 Jede Bohrequipe muss so ausgerüstet sein, dass nebst den gesetzlichen Bedingungen (Meldepflicht an Bewilligungsbehörde im Störfall) auch die in dieser Norm enthaltenen Anforderungen erfüllt werden können. Dabei wird unterschieden zwischen Material, das jede Equipe für eine fachgerechte Arbeit und eine Erstintervention bei einem Störfall (Gas- und starker Wasserzutritt, Klüftungen usw.) ständig mitzuführen hat, und Material, das bei Bedarf unverzüglich auf den Bohrplatz zu bringen ist.
- E.1.2 Für nicht vorhersehbare, geogene Gefahren sind Universalbohrgeräte gut geeignet, welche sowohl für das Imlochhammer-Bohrverfahren (Spülmedium Druckluft) als auch für das Rotationsspülverfahren (Spülmedium Wasser, sofern erforderlich mit Spülmittelzusätzen) ausgerüstet sind.

E.2 Standardausrüstung

Ausrüstung für Erdwärmesondenbohrungen:

- Gestänge und Verrohrung
- Spülungskopf (Luft- oder Stützspülung)
- Anschlussmöglichkeit am Bohrgerät zum Totpumpen von Artesern

Verrohrungskopf, bestehend aus:

- abgedichteter Gestängedurchführung
- Ableitungsanschluss für Bohrgut-Förderschläuche
- mindestens 2 Anschlussmuffen für Wasser und Manometer

Bohrgutfassung:

- druck- und knickfeste Bohrgut-Förderschläuche (z.B. Betonförderschlauch)
- Anschlussstück für Bohrgutmulde (Pfeife)
- gedeckte Mulde
- Einrichtung zum Umpumpen bei hohem Wasseranfall

Einbaueinrichtung für Erdwärmesondenrohre:

- Haspel (ab 50 m EWS-Länge erforderlich)
- Einführungsschutz beim Bohrlochkopf
- Einrichtung am Haspel, um die EWS direkt füllen und abpressen zu können
- Bremsvorrichtung am Haspel ab 150 m EWS-Länge

Hinterfüllungsausrüstung:

- Vorrichtung für das Anrichten einer pumpfähigen Suspension mit gleichmässiger Konsistenz:
 - Durchlaufmischer für Fertigmischungen (mit Regulierung der Suspensionsdichte)
 - Bei aus Einzelkomponenten zusammengesetzten Hinterfüllungen oder chargenweisem Einbringen:
 - Wanne mit Spülpumpe und Mischtrichter
 - Zwangsmischer mit Suspensionsbehälter und Einpresspumpe
- Einrichtung zum Bestimmen der eingepressten Suspensionsmenge und deren Zusammensetzung
- Injektionspumpe

E.3 Ausrüstung zur Arteserintervention

Vorrichtung zum Bestimmen des Artesers:

- Mengemessung (l/min, z.B. über Wasserstandsmessung in der Schlammulde)
- Druckmessung (Satz Manometer 0 bis 6 bar, 0 bis 16 bar)
- Trübungsmessung (Sichtweite der Zahlen beim Doppelmeter)
- Sedimentanteil (Massbecher)

Für die Sofortintervention:

- Druckkopf zum Totpumpen
- Hauptanschluss zum Totpumpen, absperrbar
- Anschlussmöglichkeit für Manometer
- Gewebetank für die Sofortintervention
- Erdwärmesonden-Gewebepacker für die Abdichtung der Erdwärmesondenbohrung
- Einrichtung zum Umpumpen bei hohem Wasseranfall

Bei Bedarf für die Sanierung nach Absprache mit den Fachleuten:

- Zusatzmulden (Absetzbecken und Auffangwannen)
- Tauchpumpe(n) zum Ableiten
- Ableitungsschläuche
- Abtransportmöglichkeiten (Saugwagen, Druckfass usw.)
- Vorrichtung für chargenweise Anmischung von beschwerter oder/und thixotroper Hinterfüllung (Zusatzeinrichtung bei Durchlaufmischern, evtl. Zusatzbehälter)
- Zuschlagstoffe (Zement, Bentonit, Schwerspat usw.)
- Erdwärmesonden-Gewebepacker (Abdichtung mit EWS) oder Vollpacker (Abdichtung ohne EWS) je nach Anforderung
- Injektionspumpe mit genügender Pumpleistung
- Spülungswaage
- Zusatzinjektionsschläuche
- Schlammpumpe

Informationen:

- Arteser sind den Behörden zu melden.
- Ableitung von Wasser nach Rücksprache mit Klärwärter und Grundstückbesitzer.
- Bei schwierigen Artesern: Beizug von Drittfirmen für Abdichtungen nach Rücksprache mit Experten.

E.4 Ausrüstung zur Gasintervention

Vorrichtung zum Bestimmen des Gasaustritts:

- Gasmessgerät (Geruch, Geräusch) oder Fachpersonal beiziehen
- Druckmessung (Satz Manometer 0 bis 6 bar, 0 bis 16 bar)

Für die Sofortintervention:

- Einrichtung, um Wasser am Verrohrungskopf einzupressen
- Druckkopf zum Totpumpen
- Hauptanschluss zum Totpumpen, absperrbar
- Anschlussmöglichkeit für Manometer
- Ableitungsschläuche, um Gas abzuleiten
- Absperr- und Markiermaterial (Triopan Explosion)
- Erdwärmesonden-Gewebepacker für die Abdichtung der Erdwärmesondenbohrung

Bei Bedarf für die Sanierung nach Absprache mit den Fachleuten:

- Bohrung mit Stützspülung
- Abfackleinrichtung
- Vorrichtung für chargenweise Anmischung von beschwerter oder/und thixotroper Hinterfüllung (Zusatzeinrichtung bei Durchlaufmischern, evtl. Zusatzbehälter)
- Zuschlagstoffe (Zement, Bentonit, Schwerspat usw.)
- Erdwärmesonden-Gewebepacker (Abdichtung mit EWS) oder Vollpacker (Abdichtung ohne EWS) je nach Anforderung
- Injektionspumpe mit genügender Pumpleistung
- Spülungswaage
- Zusatzinjektionsschläuche
- Schlammpumpe

Informationen:

- Gasausbrüche sind den Behörden zu melden.
- Bohrstelle grossräumig absperren, je nach Ausmass Feuerwehr und Polizei aufbieten.
- Bei schwer zu beherrschenden Gasausbrüchen: Beizug von Drittfirmen für Abdichtungen nach Rücksprache mit Experten.

Anhang F (informativ)

Ausführung

F.1 Allgemein

F.1.1 Geologie

F.1.1.1 Die Schweiz besteht aus 3 geologischen Hauptgebieten: Jura, Mittelland (Molassebecken) und Alpen. Im Jura, in den Alpen und in den Lockergesteinen des Mittellandes werden häufig komplexe geologische und hydrogeologische Verhältnisse angetroffen.

F.1.1.2 Das Bohrrisiko kann je nach lokalen geologischen Verhältnissen unterschiedlich gross sein. Dem Bohrrisiko ist an Standorten mit komplexen geologischen Verhältnissen generell Beachtung zu schenken. Dasselbe gilt für anthropogene oder geogene Gefahren.

F.1.2 Begrenzung der Bohrtiefe

Für eine Bohrung gibt es technische Grenzen des Bohrverfahrens, gegeben durch die maximal mögliche Bohrtiefe des Bohrgerätes, die maximale Verrohrungstiefe, die Beherrschbarkeit des Bohrrisikos, konstruktive Einschränkungen durch die Erdwärmesondenrohre, wie EWS-Material, Hydraulik, Druck- und Temperaturbeständigkeit, sowie Einschränkungen aufgrund behördlicher Auflagen.

F.2 Bohrverfahren

Für Erdwärmesondenbohrungen werden in erster Linie das Imlochhammer-Bohrverfahren und das Rotationsspülbohrverfahren auf der Basis von Wasser- oder Tonspülungen angewendet. Neu auftretende Bohrverfahren, z.B. die Vibrorammung, und andere Bohrverfahren wie Rotationskernbohrungen oder Schneckenbohrverfahren werden hier nicht betrachtet, da sie von untergeordneter Bedeutung für Erdwärmesondenbohrungen in der Schweiz sind.

Beim Abteufen der Erdwärmesondenbohrungen geht es im Gegensatz zu Brunnenbohrungen nicht um die Funktion des Bohrloches an sich (z.B. Förderung von Grundwasser), sondern lediglich um die Herstellung eines Loches zur Aufnahme der Erdwärmesondenrohre. Die Bohrungen werden dabei sowohl mit selbstfahrenden, vollhydraulischen Bohranlagen (LKW-Bohranlagen) als auch mit vollhydraulischen Raupenbohranlagen ausgeführt. Bei der Ausführung steht ein rasches und sicheres Abteufen der Bohrung unter Berücksichtigung der grundwasserschutzrelevanten Rahmenbedingungen im Vordergrund.

F.2.1 Imlochhammerbohrung

Bei einer Imlochhammerbohrung wird die zur Zertrümmerung des Gesteins notwendige Schlagenergie mittels Druckluft aufgebracht. Dazu wird die von einem Hochdruckkompressor (z.B. 25–35 bar) übertage erzeugte Druckluft durch das rotierende Bohrgestänge auf einen unten am Gestänge befestigten Imlochhammer geleitet. Die Luft treibt dort die Meisselplatte an, die das Gestein zu Bohrklein zertrümmert. Über den Volumenstrom der Luft (z.B. 20–35 m³/min) wird das Bohrklein durch den Ringraum zwischen Bohrgestänge und anstehendem Gebirge zutage gefördert. Aufgrund der technisch limitierten Druckluftzufuhr des Kompressors sind bei hohem Wasseranfall im Bohrloch Tiefen über 250 m nur noch eingeschränkt machbar. Das Imlochhammerbohrverfahren kann aufgrund der fehlenden Stützwirkung der Luft nur in standfestem Gebirge – oder in nichtstandfestem Gebirge nur mit einer dem Imlochhammer nachgeschobenen fortlaufenden Verrohrung mittels Doppelrotorkopf oder Doppeldrehkopf – eingesetzt werden. Die maximalen Verrohrungstiefen betragen etwa 70–100 m. In feinkörnigen Sedimenten und strukturempfindlichen Lithologien wie Tonen, Silten und Sanden sowie locker gelagerten Kiesen darf das Imlochhammerbohrverfahren aufgrund der Grundbruchgefahr und der weiträumigen Zerstörung des hydrogeologisch relevanten Bodenaufbaus generell nicht angewendet werden. Bei Zufluss von Gas, hohem Wasseranfall und artesisch gespanntem Grundwasser ist eine Imlochhammerbohrung schlecht bis gar nicht kontrollierbar, so dass dieses Bohrverfahren nur bei guter Kenntnis der Lithologie angewendet werden darf.

F.2.2 **Rotationsspülbohrverfahren**

Bei einer Rotationsspülbohrung mit Stützflüssigkeit (Wasser- oder Tonspülung) wird über einen hydraulisch betriebenen Kraftdrehkopf der unten am Gestänge befestigte Rollen- oder Flügelmeissel unter gezieltem Andruck gedreht. Das damit zerbohrte Gestein wird in Form von sogenannten Cuttings (Bohrklein) über die in einem geschlossenen Kreislauf durch das Bohrgestänge zirkulierende Bohrspülung im Ringraum zwischen Bohrgestänge und Gebirge ausgetragen. Die Bohrspülung besteht aus Wasser mit evtl. eingemischten Tonen (Tonspülung). Sie kann mit unterschiedlichen umweltverträglichen Additiven (Spülmittelzusätze) versehen sein. Dazu sind unter anderem spezielle Spülpumpen sowie entsprechend fundierte Kenntnisse in der Spülungstechnik notwendig. Die Rotationsspülbohrtechnik mit Stützflüssigkeit wird bei Erdwärmesondenbohrungen ausschliesslich im Lockermaterial (Ton, Silt, Sand, Kies) bei grossen Überlagerungsmächtigkeiten eingesetzt; aufgrund des zu langsamen Bohrfortschrittes findet sie in standfestem Fels für Erdwärmesondenbohrungen kaum Anwendung. Die Einsatztiefe ist durch die Bohranlagen- (Hakenlast und Drehmoment) sowie Spülpumpenkapazität eingeschränkt. Die Rotationsspülbohrtechnik erlaubt aufgrund der Möglichkeiten der Verwendung von Spülmittelzusätzen (Kreide, Schwerspat usw.) die Kontrolle über zuströmende Gase, Wasser sowie Arteser. Universalbohranlagen erlauben daher im Notfall eine sofortige Intervention und Reaktion auf alle Vorkommnisse und machen bei einer entsprechenden Ausbildung des Personals alle Lithologien beherrschbar.

F.2.3 **Zusammenfassung**

Tabelle 9 Beherrschbarkeit besonderer Vorkommnisse

	Wasser	Arteser	Gas	Stabilität
Imlochhammer ohne Verrohrung	schlecht	unkontrolliert	unkontrolliert	schlecht
Imlochhammer mit Verrohrung	mittel	schlecht/mittel	schlecht	gut
Rotationsspülbohrung mit Tonspülung	gut	kontrollierbar	kontrollierbar	kontrollierbar

Tabelle 10 Bohrverfahren und Geologie

	Fels	Moräne	Sand/Kies	Silt/Ton
Imlochhammer ohne Verrohrung	gut	mittel	schlecht	schlecht
Imlochhammer mit Verrohrung	nicht notwendig	gut	mittel	schlecht bis mittel
Rotationsspülbohrung mit Tonspülung	zeitaufwendig	mittel	gut	gut

F.2.4 **Bohrgutentsorgung**

F.2.4.1 Das Bohrgut muss gemäss BAFU-Vollzugshilfe (siehe 0.2.3) und kantonalen Merkblättern entsorgt werden.

F.2.4.2 Das Bohrgut kann über Absetzbecken oder Aufbereitungsanlagen in Schlämme und Abwasser aufgeteilt werden.

F.2.4.3 Der Bohrschlamm muss in eine Behandlungsanlage oder in eine Inert-, Reststoff- oder Reaktor-deponie entsorgt werden.

F.2.4.4 Genügend klares Abwasser kann mit Bewilligung abgeleitet werden.

F.3 Hinterfüllung

F.3.1 Die Anforderungen an die Hinterfüllung sind in 4.3.1 beschrieben. Die Hinterfüllung muss nach den Richtlinien des BAFU ausgeführt werden. Eine mögliche Hinterfüllung, die diese Bedingungen erfüllt, ist:

100 kg Bentonit (Calcium-Montmorillonit) + 200 kg Zement (z.B. CEM III/B 325 N HSKH) + 900 Liter Wasser, was 1000 Liter Suspension ergibt. Die Wärmeleitfähigkeit beträgt 0,85 W/(m·K) [4].




Diese Hinterfüllung ist nicht frostbeständig. Bei frostbeständigen Hinterfüllungen verschiebt sich das Problem in das umliegende Gebirge, das häufig nicht frostbeständig ist. Die Erdwärmesonde ist daher unabhängig vom Hinterfüllungsmaterial auf eine korrekte Auslegung angewiesen, um ihre Funktion erfüllen zu können.

F.3.2 Fertigmischungen werden von verschiedenen Herstellern angeboten. Bei deren Verwendung ist vor dem Einsatz zu prüfen, ob deren Dichte im Verhältnis zur eingesetzten EWS-Tiefe nicht zu gross ist, damit gemäss 5.3.1 die Rohre von aussen her nicht gequetscht werden (Tabelle 11).

Tabelle 11 Differenzdruck (Überdruck von aussen nach innen) am Erdwärmesondenfuss in Abhängigkeit von Hinterfüllung und EWS-Länge bei wassergefüllten Erdwärmesonden

EWS-Länge	Dichte der Hinterfüllung				
	1200 kg/m ³	1400 kg/m ³	1600 kg/m ³	1800 kg/m ³	2000 kg/m ³
40 m	0,8 bar	1,6 bar	2,4 bar	3,1 bar	3,9 bar
60 m	1,2 bar	2,4 bar	3,5 bar	4,7 bar	5,9 bar
80 m	1,6 bar	3,1 bar	4,7 bar	6,3 bar	7,8 bar
100 m	2,0 bar	3,9 bar	5,9 bar	7,8 bar	9,8 bar
120 m	2,4 bar	4,7 bar	7,1 bar	9,4 bar	11,8 bar
140 m	2,7 bar	5,5 bar	8,2 bar	11,0 bar	13,7 bar
160 m	3,1 bar	6,3 bar	9,4 bar	12,6 bar	15,7 bar
180 m	3,5 bar	7,1 bar	10,6 bar	14,1 bar	17,7 bar
200 m	3,9 bar	7,8 bar	11,8 bar	15,7 bar	19,6 bar
220 m	4,3 bar	8,6 bar	12,9 bar	17,3 bar	21,6 bar
240 m	4,7 bar	9,4 bar	14,1 bar	18,8 bar	23,5 bar
260 m	5,1 bar	10,2 bar	15,3 bar	20,4 bar	25,5 bar
280 m	5,5 bar	11,0 bar	16,5 bar	22,0 bar	27,5 bar
300 m	5,9 bar	11,8 bar	17,7 bar	23,5 bar	29,4 bar
320 m	6,3 bar	12,6 bar	18,8 bar	25,1 bar	31,4 bar
340 m	6,7 bar	13,3 bar	20,0 bar	26,7 bar	33,4 bar
360 m	7,1 bar	14,1 bar	21,2 bar	28,3 bar	35,3 bar
380 m	7,5 bar	14,9 bar	22,4 bar	29,8 bar	37,3 bar
400 m	7,8 bar	15,7 bar	23,5 bar	31,4 bar	39,2 bar

Der maximal zulässige Differenzdruck von aussen nach innen bei U-Rohr-EWS SDR 11 beträgt 8 bar.

-  Einbau der EWS ohne Vorbehalt zugelassen
-  Erdwärmesonden können nur hinterfüllt werden, wenn der Kopf dicht verschlossen ist. Die Druckprüfung kann erst gemacht werden, wenn die Hinterfüllung eine Mindestfestigkeit erreicht hat.
-  Es können keine PE-100-SDR-11-Erdwärmesonden mehr eingebaut werden, da der Kopfdruck bei verschlossenen Erdwärmesonden den kurzfristig maximal zulässigen Druck von 21 bar überschreitet.

Bei Fertigmischungen müssen die Rezepturen der Hersteller eingehalten werden, auch wenn die Mischung dadurch schlecht verpumpbar ist. Gewisse Hinterfüllungen können daher nur bis zu einer gewissen Einbautiefe verwendet werden, da sonst der Einpressdruck die Festigkeit des Injektions-schlauches überschreitet. Abhilfe können grössere oder mehrere Injektionsschläuche bieten.

Die Mischungen dürfen sich nicht entmischen, zu dünnflüssig sein, im abgebundenen Zustand sandartig zerbröseln oder zu Rissbildung neigen.

F.3.3 Wenn die vollständig mit Wasser gefüllten EWS am Kopf druckdicht abgeschlossen werden (z.B. Schweisskappe), kann das Beulen (Quetschen) während des Einbringens der Hinterfüllung verhindert werden (Grenzen siehe Tabelle 11). Die Kappen müssen bis zur teilweisen Aushärtung der Hinterfüllung montiert bleiben. Es ist sicherzustellen, dass die Hinterfüllung genügend Eigenstabilität aufweist, um bei ungenügender Aushärtung nicht durch «Nachfliessen» die EWS dennoch zu quetschen.

Die Fertigmischungen können je nach Zuschlagstoffen verbesserte Eigenschaften aufweisen, wie erhöhte Wärmeleitfähigkeit oder Frostbeständigkeit.

Die Suspension muss chargenweise angerührt und verpresst werden; bei Fertigmischungen ist auch eine kontinuierliche Mischung und Verpressung möglich.

Die Mischungen sind klumpenfrei anzumischen. Beim Einpressen sind die maximal zulässigen Drücke für das Injektionsrohr zu beachten.

F.3.4 In Kluftezonen und in permeablen Bereichen des Bohrloches ist die Hinterfüllung thixotroper zu machen. Dies verhindert ein Wegfliessen der Hinterfüllung im Ruhezustand. Bei grossen Klüften ist eventuell mit mehreren Injektionsrohren (1. Rohr bis Endtiefe, 2. Rohr bis knapp über Kluft) und mit Erdwärmesonden-Gewebepackern zu arbeiten. Grosse Klüfte oder stark durchlässige Bereiche können durch Einbauen von fix einzementierten Verrohrungen oder den Einsatz anderer Methoden, die ein Wegfliessen der Hinterfüllung verhindern, überbrückt werden. Der nicht hinterfüllte Anteil der Bohrung kann thermisch nicht als aktive Sondenlänge gerechnet werden.

F.3.5 Zonen mit Wasserzutritt oder gespannte Grundwasserleiter müssen mit beschwerten Hinterfüllungen und/oder Erdwärmesonden-Gewebepackern abgedichtet werden. Dabei muss das Gewicht der Hinterfüllungssäule grösser als der Druck des einströmenden Wassers sein, oder das Wasser muss durch Zusatzeinbauten verdrängt werden. Hilfreich ist eine stark thixotrope Hinterfüllung.

F.3.6 Das Volumen der verpressten Suspension ist zu kontrollieren und zusammen mit der verwendeten Rezeptur zu protokollieren. Dabei ist eine Berechnung der theoretisch möglichen Verpressmenge vorzunehmen.

F.3.7 Nicht vollständige Hinterfüllungen sind nur mit Bewilligung der zuständigen Gewässerschutzbehörde zulässig (siehe D.1).

F.4 Anschluss der Erdwärmesonden

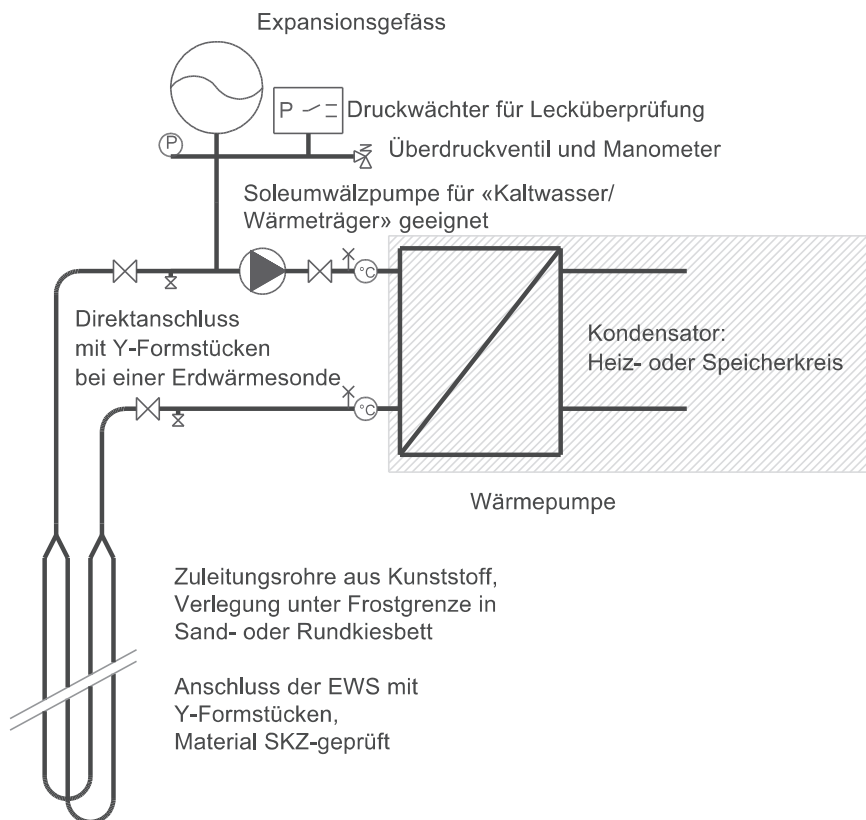
Die Anforderungen an den Anschluss sind unter 4.1 und 4.2 definiert.

Die Rohre sind zu ihrem Schutz in ein Sand- oder Rundkiesbett zu verlegen und mit einem Warnband zu markieren.

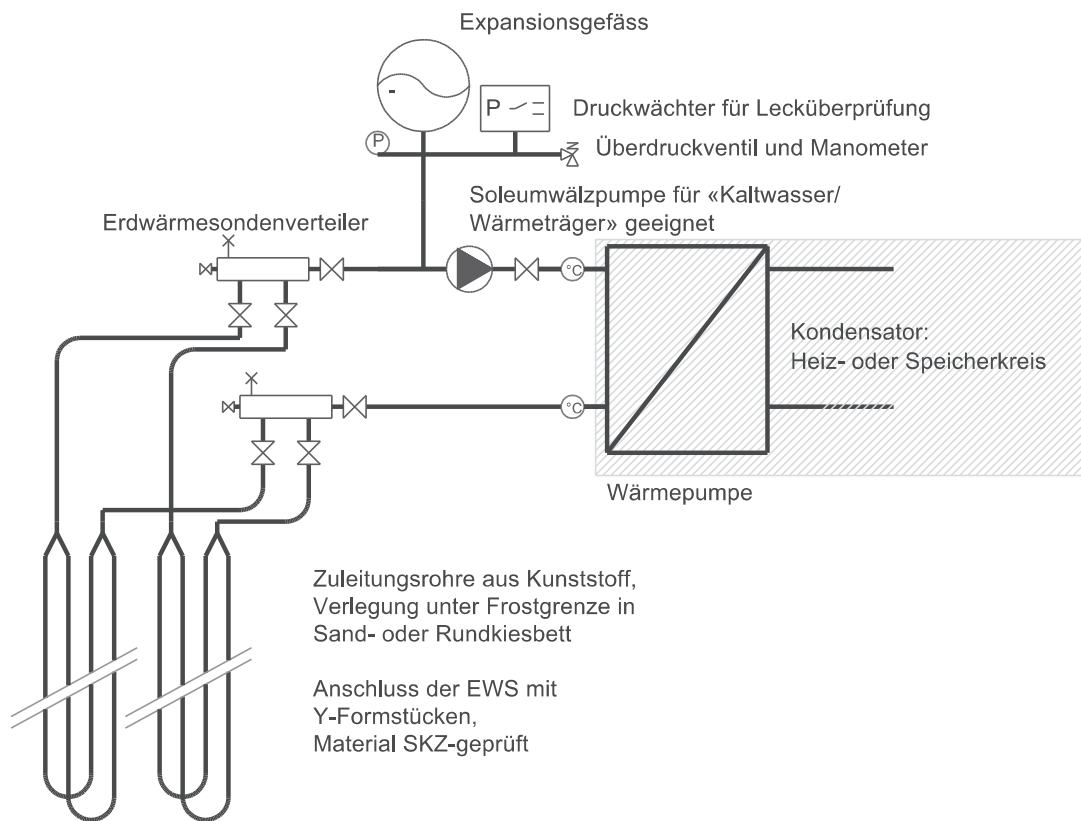
Der Verteiler muss korrosionsfest ausgeführt sein. Er kann in einem Schacht (z.B. Lichtschacht) oder im Haus montiert sein.

Figur 29 zeigt das Schema für eine einzelne Doppel-U-Rohr-Erdwärmesonde, die Figuren 30 und 31 die Schemas für mehrere Doppel-U-Rohr-Erdwärmesonden (mit und ohne Y-Formstücke). Diese Schemas stehen stellvertretend für die möglichen Anschlussvarianten.

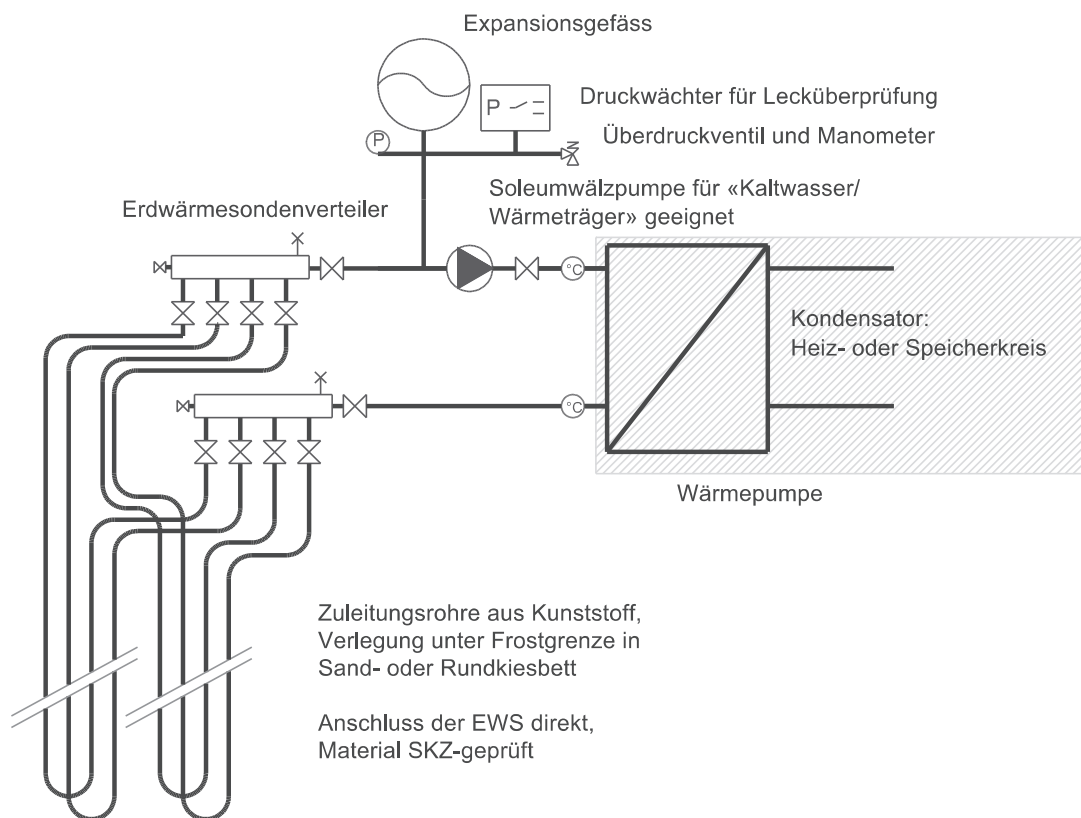
Figur 29 Prinzipschema für eine Erdwärmesonde



Figur 30 Prinzipschema für mehrere Erdwärmesonden mit Y-Formstücken



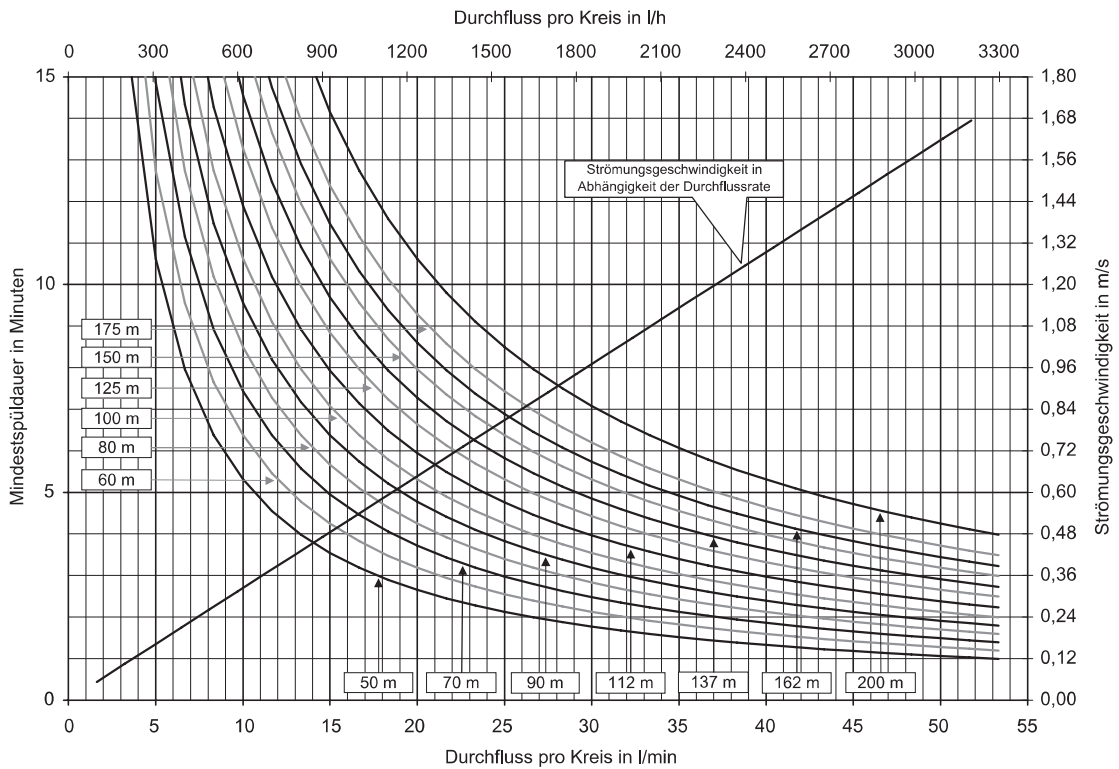
Figur 31 Prinzipschema für mehrere Erdwärmesonden ohne Y-Formstücke



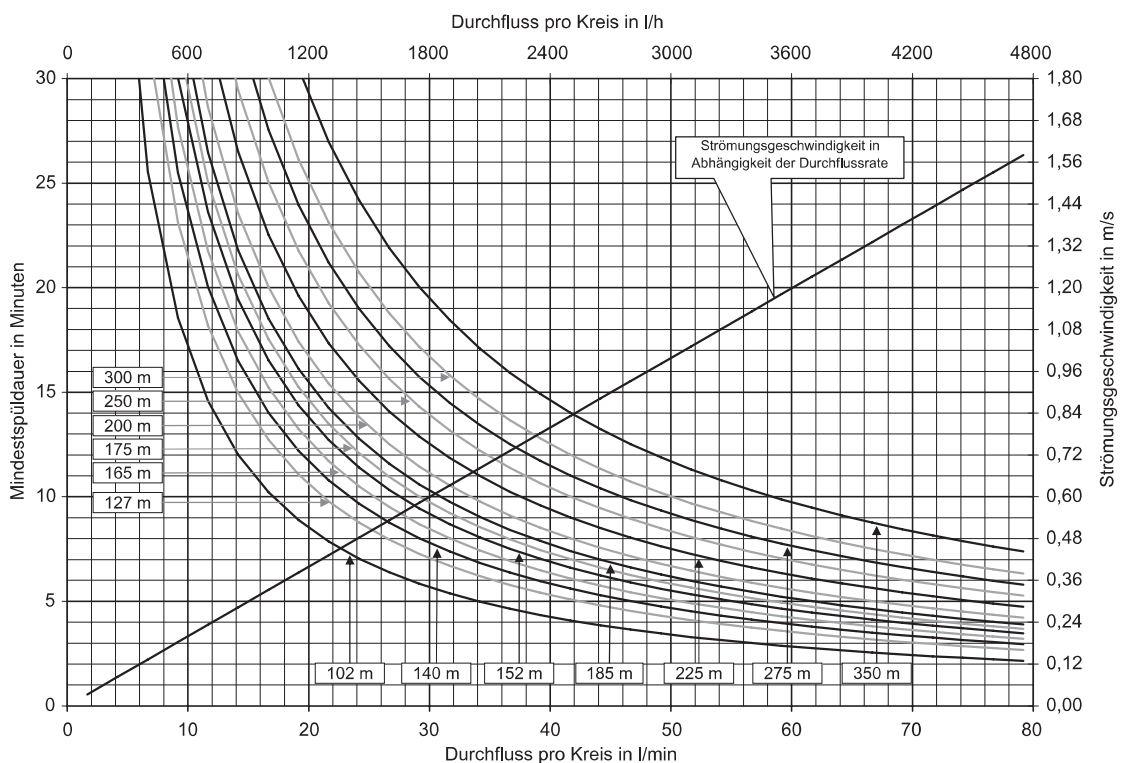
F.5 Spüldauer

Die Erdwärmesonde muss so lange gespült werden, bis das saubere Wasser mindestens einen vollen Umlauf durch den Kreis zurücklegt hat. In den folgenden Diagrammen ist für verschiedene Längen und Durchmesser die entsprechende Mindestspüldauer in Abhängigkeit der Durchflussrate angegeben.

Figur 32 Mindestspüldauer für einen Umlauf pro Kreis bei EWS \varnothing 32 mm



Figur 33 Mindestspüldauer für einen Umlauf pro Kreis bei EWS \varnothing 40 mm



Anhang G

Publikationen

G.1 Normen und Leitfäden

- [1] VDI 4640 Thermische Nutzung des Untergrundes, Blatt 1 bis 4
- [2] Leitfaden zur Nutzung von Erdwärme. 4., überarbeitete Auflage, Mai 2005, Umweltministerium Baden-Württemberg

G.2 Berichte und Dokumentationen

- [3] Dokumentation SIA D 0179, 2003. Energie aus dem Untergrund. Erdreichspeicher für moderne Gebäudetechnik
- [4] Rohner, E., Salton, M., Rybach, L., 2001. Lebensdauer von Erdwärmesonden in Bezug auf Druckverhältnisse und Hinterfüllung. Bundesamt für Energie, Schlussbericht PN 20'536, BFE Publ. 210'140
- [5] Signorelli, S., 2004. Geoscientific investigations for the use of shallow low enthalpy systems. Diss. ETH Nr. 15519
- [6] Eskilson, P., 1987. Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes. Department of Mathematical Physics, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden. ISBN 91-7900-298-6

G.3 Berechnungsprogramme und Datenbanken

- [7] Leu, W., Mégel, Th., Schärli, U., 2006, SwEWS – Geothermische Eigenschaften der Schweizer Molasse (Tiefenbereich 0–500 m). Datenbank für Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität, Gesteinsdichte und Porosität
- [8] Hellström, G., Sanner, B., EED – Earth Energy Designer. User manual. Download Probeversion: www.buildingphysics.com
- [9] Huber, A., Programm EWS. Berechnung von Erdwärmesonden. Benutzerhandbuch und Download Probeversion: www.hetag.ch
- [10] Pahud, D., 2007, PILESIM2: Simulation Tool for Heating/Cooling Systems with Energy Piles or multiple Borehole Heat Exchangers. Scuola Universitaria Professionale della Svizzera Italiana, Download Probeversion: www.isaac.supsi.ch
- [11] Remund, J., Kunz, St., Meteororm. Global meteorological database for applied climatology, Meteotest Bern, www.meteororm.com
- [12] Koenigsdorff, R., GEO-HANDlight – Handrechenverfahren zur überschlägigen Bemessung von Erdwärmesondenfeldern. Internationales Anwenderforum Oberflächennahe Geothermie, 26.–27. April 2007, Freising, Deutschland
- [13] TRNSYS, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin (USA), und TRANSSOLAR, Stuttgart, www.transsolar.com

Abkürzungen der in der Kommission SIA 384/6 vertretenen Organisationen

EPFL	École polytechnique fédérale de Lausanne
FWS	Fördergemeinschaft Wärmepumpen Schweiz
SIA KHE	Kommission für Haustechnik- und Energienormen des SIA
SVG	GEOTHERMIE.CH – Schweizerische Vereinigung für Geothermie
SWKI	Schweizerischer Verein von Gebäudetechnik-Ingenieuren

Kommission SIA 384/6

		Vertreter von
Präsident	Jules Wilhelm, dipl. Bau-Ing. UTB/SIA, Pully	SVG
Mitglieder	Adrian Altenburger, dipl. HLK-Ing. HTL/SIA, Zürich Stefan Berli, dipl. Geol. SIA, St. Gallen Jean-Pierre Clément, Dr. rer. nat., Bern Marco Filipponi., Dr. sc. nat. UNIL, Lausanne Peter Hubacher, dipl. Ing. HTL, Engelburg Reto Lang, dipl. Bau-Ing. ETH/SIA, Mönchaltorf Michael Menzl, dipl. Oek., Benken Hanspeter Oester, dipl. Arch. ETH/SIA, Zürich Ladislav Rybach, Prof. Dr., Dr. h.c., Geol. ETH/SIA, Zürich	SWKI Bohrunternehmung Kanton EPFL FWS SIA KHE Hersteller Material Architekten Berater Geothermie
Sachbearbeiter	Walter Eugster, Dr. sc. nat., dipl. Natw. ETH/SIA, Zürich Daniel Pahud, Dr., dipl. Phys., Canobbio Ernst Rohner, dipl. Ing. HTL, Zürich Sarah Signorelli, Dr. sc. ETHZ, Zürich	

Genehmigung und Gültigkeit

Die Zentralkommission für Normen und Ordnungen des SIA hat die vorliegende Norm SIA 384/6 am 8. Juni 2009 genehmigt.

Sie ist gültig ab 1. Januar 2010.

Copyright © 2010 Zurich by SIA

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Fotokopie, Mikrokopie, CD-ROM usw.), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und das der Übersetzung, sind vorbehalten.