

Anwendbarkeit künstlicher neuronaler Netze zur Untergrundbewertung in der oberflächennahen Geothermie

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
DOKTORS DER NATURWISSENSCHAFTEN

von der Fakultät für
Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften
der Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH)
genehmigte

DISSERTATION

von
Dipl.-Geol. Maike Inga Woernle
aus Hilden

Tag der mündlichen Prüfung: 22.02.2008

Hauptreferent: Prof. Dr. Dr. K. Czurda
Korreferent: Prof. Dr. B. Reichert

Karlsruhe 2008

Kurzfassung

Ziel der vorliegenden Arbeit war die Untersuchung der Anwendbarkeit künstlicher neuronaler Netze (KNN) im Bereich der oberflächennahen Geothermie. Es wurde dabei nur die Nutzung mit Erdwärmesonden berücksichtigt. Besonders für Kleinanlagen können neue Methoden, die mit geringem Planungsaufwand eine erhebliche Steigerung der Planungssicherheit bieten, wesentliche Fortschritte gegenüber herkömmlichen Methoden bedeuten. Künstliche neuronale Netze versprechen hier großes Potential. Voraussetzung ist eine verlässliche Grundlage von Beispieldaten aus dem realen Feldbetrieb, um ein erfolgreiches Training der Netze zu ermöglichen.

Eine solche Datengrundlage bietet eine schweizer Studie, in der über mehrere Jahre hinweg Kleinanlagen mit Wärmepumpen bis 20 kW vermessen wurden. Mit Hilfe einer vergleichenden Untersuchung der allgemeinen Merkmale des Ausbaus von deutschen und schweizer Anlagen wurde die allgemeine Übertragbarkeit der Zusammenhänge abgeschätzt. Die Erhebungen der Informationen einzelner Umweltämter in Baden-Württemberg über bestehende Anlagen haben außerdem ergeben, dass die Dokumentation des Ausbaus nicht immer gemäß der bestehenden Vorgaben durchgeführt wird.

Es wurden neuronale Netze trainiert, die aus wenigen Eingabegrößen die Soletemperatur in der Erdwärmesonde prognostizieren können. Diese Entwicklung eines leistungsfähigen KNN-Modells beinhaltete die Vorverarbeitung der Datengrundlage, die Erprobung unterschiedlicher Partitionierungsverfahren zur Trennung der Daten in Trainings-, Test- und Validierungsanlagen, das eigentliche Netzwerktraining inklusive der Optimierung (in der Regel Verkleinerung) der Eingabemuster sowie der Knotenanzahl und abschließende Sensitivitätsanalysen. Die Sensitivitätsanalysen stellen einerseits eine Art Parameterstudie dar und dienen andererseits der Plausibilitätskontrolle des trainierten Netzes.

Es konnte gezeigt werden, dass auch schon mit relativ geringem Trainingsdate-

umfang durch die neuronalen Netze präzise Prognosen der Soletemperatur geleistet werden können. Dem Vorgehen bei der Datenpartitionierung muss dabei besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden. Die Sensitivitätsanalysen machen deutlich, welche Parameter für die Effizienz der Sonde besonders wichtig sind.

Das entwickelte Modell kann auf neue Standorte nur übertragen werden, wenn solche Voraussetzungen vorliegen, wie sie von den Trainingsdaten repräsentiert werden. Hinsichtlich des Ausbaus der Erdwärmesonden ist eine Anwendung auf deutsche Verhältnisse denkbar. Die regionale Übertragbarkeit hängt stark von der lithologischen Ausprägung der Gesteine am Standort ab. Daher müssen hierfür die konkreten regionalgeologischen Verhältnisse besonders berücksichtigt werden.

Abstract

The goal of this thesis was to examine the applicability of artificial neural networks (ANN) for planning tasks in the field of shallow geothermal energy use, particularly considering vertical borehole heat exchangers (BHE). Especially for smaller, private plants a significant improvement of planning security is expected. Artificial neural networks offer high potential for this application. A reliable set of representative field data of existing plants is needed for such investigations.

A swiss study collected such data over years. Thess data were provided for the neural network application. A survey of the general plant features in Germany provided the the base for a comparison of Swiss and German plants, to assure the transferability to German conditions. This survey also revealed shortcomings in the documentation of existing BHEs in Germany.

Artificial neural networks were trained to predict the temperature of the fluid (salt solutions or water with antifreezes) within the BHE from as few input parameters as possible. This process included the preprocessing of data, the test of diverse partitioning procedures, the training itself with the optimization (reduction) of the input vector and number of nodes and finally sensitivity studies. The latter represent on the one hand a kind of parameter study and should on the other hand confirm the plausibility of the ANN-model.

Although the amount of available data was rather small, it was possible to develop a neural network with a high precision of prognosis of the fluid's temperature. For that the partitioning of the data demands sophisticated approach. The sensitivity analyses show the parameters which are of high influence for the BHE's efficiency.

The developed model can be transferred to new sites as long as the site conditions are comparable to those in the training data. Considering the general plant characteristics in Germany and Switzerland we can assume a good trans-

ferability of the model. For the application in regions with a different regional geology, the individual stratigraphical and lithological specifications have to be taken into account thoroughly.

Vorwort

Die hier vorgestellte Arbeit wurde im Zeitraum vom Juli 2004 bis Juni 2007 am Lehrstuhl für Angewandte Geologie der Universität Karlsruhe (TH) durchgeführt. Ich danke Herrn Professor Dr. Dr. Kurt Czurda für die Betreuung dieser Arbeit und das mir entgegen gebrachte Vertrauen. Frau Prof. Dr. Barbara Reichert danke ich für die Übernahme des Korreferats.

Die intensive Beschäftigung mit dem Thema wurde mir ermöglicht durch ein Promotionsstipendium der Deutschen Bundesstiftung Umwelt. Der Stiftung und meinem Betreuer Herrn Dr. Maximilian Hempel möchte ich nicht nur für die finanzielle Unterstützung, sondern auch für die ideelle Förderung durch die zahlreichen, wertvollen Seminare, Kolloquien und Kontakte danken.

Darüber hinaus wurde die Arbeit von der CO₂NTRA-Klimaschutzinitiative der Saint-Gobain Isover G+H AG finanziell gefördert. Auch dafür möchte ich meinen Dank aussprechen.

Herrn Fabrice Rognon vom Schweizer Bundesamt für Energie und Herrn Peter Hubacher von Hubacher Engineering danke ich für die gute Zusammenarbeit hinsichtlich der Bereitstellung der Daten aus der FAWA-Studie.

Neben der finanziellen Unterstützung gab es zahlreiche weitere Hilfestellungen, Anregungen und Beistände, die zum Gelingen meiner Arbeit wesentlich beigetragen haben. Herrn Prof. Dr. A. Waibel vom Institut für Theoretische Informatik und Herrn Dr.-Ing G. Bräuning vom Institut für Technische Thermodynamik (beide Universität Karlsruhe) danke ich für Ihre Bereitschaft zu interessanten, konstruktiven Gesprächen über das Thema und die daraus resultierenden Ideen und Anregungen.

Meinen Kollegen vom Lehrstuhl für Angewandte Geologie möchte ich für die stets gute Arbeitsatmosphäre und ständige Diskussionsbereitschaft in fachlichen Fragen danken. Besonders hervorheben möchte ich hier Verena Herrmann, Jochen Klinger und Petra Schlager. Tanja Liesch und Marc Ludewig

waren mir dankenswerter Weise oft wichtige Helfer und Gesprächspartner bei EDV- und Informatik-Fragen. Auch Herrn Dr. Roman Zorn danke ich für seine Unterstützung.

Ein weiterer Dank gilt meinen Mitstipendiaten bei der Deutschen Bundestiftung Umwelt, insbesondere Jasmin Lenzion, Sven Rohde, Kevin Frank, Susan Ebeling, Katrin Ruff, Steffen Weil und Sebastian Schiefer. Das durch die gemeinsame Stipendienzeit entstandene Netzwerk von Umweltwissenschaftlern empfinde ich als große fachliche wie persönliche Bereicherung.

Aber auch in meinem engen privaten Umfeld gibt es viele Menschen, denen ich für Ihre Unterstützung in den letzten drei Jahren ganz herzlich danken möchte, unter anderen Kerstin Rüsgen und Henrik Borchers, sowie ganz besonders meinen Eltern Angelika und Heinz Rüsgen. Der größte Dank gilt meinem Mann Martin.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	I
Abstract	III
Vorwort	V
Inhaltsverzeichnis	IX
Abbildungsverzeichnis	XIII
Tabellenverzeichnis	XIV
1 Einleitung	1
1.1 Oberflächennahe Erdwärmenutzung zur Gebäudebeheizung . .	1
1.2 Problemstellung und Zielsetzung	3
1.3 Aufbau der vorliegenden Arbeit	6
2 Theoretische Grundlagen	7
2.1 Funktionsweise einer Erdwärmeheizung	7
2.2 Herkömmliche Methoden zur Untergrundbewertung	12
2.3 Künstliche neuronale Netze	14
2.3.1 Das biologische Vorbild	14
2.3.2 Aufbau künstlicher neuronaler Netze	16
2.3.3 Training neuronaler Netze	19
3 Datengrundlage	23
3.1 Aktueller Stand der Datenerhebung in Deutschland und weltweit	23
3.2 Umsetzung des Leitfadens Baden-Württemberg in den Jahren 2002-2004	25

Inhaltsverzeichnis

3.2.1	Vorgehensweise	26
3.2.2	Ergebnisse	28
3.2.3	Bewertung	35
3.3	Die Schweizer FAWA-Studie	36
3.4	Vergleich von deutschen und schweizer Anlagendaten	40
3.4.1	Anlagengröße	41
3.4.2	Sondenanzahl	41
3.4.3	Sondentiefe	41
3.4.4	Gesamtsondenlängen	42
3.4.5	Sondenrohrdurchmesser	42
3.4.6	Hinterfüllung	44
3.4.7	Frostschutz	44
3.4.8	Geografische Höhenlage	45
4	Geologischer Überblick	47
4.1	Die Schweiz	47
4.1.1	Übersicht	47
4.1.2	Juragebirge	48
4.1.3	Mittelland	50
4.1.4	Alpen	52
4.2	Das westliche Baden-Württemberg	54
4.2.1	Übersicht	54
4.2.2	Schwarzwald	55
4.2.3	Ober rheingraben	57
5	Vorgehen zur Entwicklung neuronaler Netze	59
5.1	Vorverarbeitung der Daten	59
5.1.1	Dateneingabe und -manipulation	59
5.1.2	Normierung	64
5.2	Datenpartitionierung	64
5.3	Training neuronaler Netze	65
5.4	Netzwerkoptimierung	65
5.4.1	Eingabemuster	65
5.4.2	Anzahl verdeckter Neuronen	67
5.4.3	Validierung	67
5.4.4	Sensitivitätsanalysen	68

6	Ergebnisse und Interpretation der KNN-Analysen	70
6.1	Ergebnisse	70
6.1.1	Datenpartitionierung	70
6.1.2	Eingabemuster	73
6.1.3	Sensitivitätsanalysen	74
6.2	Interpretation der Ergebnisse neuronaler Netze	80
6.2.1	Datenpartitionierung	80
6.2.2	Netzwerkarchitektur	81
6.2.3	Sensitivitätsanalysen	81
6.2.4	Bestes neuronales Netz: a900 aus Analyseschritt II d	83
7	Diskussion und Ausblick	86
7.1	Leitfaden und Richtlinien	86
7.2	KNN-Modell: Genauigkeit und Übertragbarkeit	87
7.2.1	Modellgenauigkeit	87
7.2.2	Allgemeine Übertragbarkeit	88
7.2.3	Regionale Übertragbarkeit	89
7.3	Anwendung neuronaler Netze in einem Planungstool	92
7.4	Potential neuronaler Netze für die oberflächennahe Geothermie	93
8	Zusammenfassung	94
	Literaturverzeichnis	97
A	Abkürzungen und Formelzeichen	105
B	Geologische Übersichtskarten	108

Abbildungsverzeichnis

1.1	Energieflussdiagramm für die Kompressionswärmepumpe (nach IE, 1999).	2
1.2	Marktentwicklung für Wärmepumpen seit 1992 (nach Angaben des BUNDESVERBAND WÄRMEPUMPE (BWP) (2007)).	3
1.3	Vorgehensweise der klassischen Modellierung (links) und der Methodik der neuronalen Netze (rechts).	5
2.1	Prinzipskizze einer Erdwärme-Heizungsanlage für ein Einfamilienhaus.	8
2.2	Einbau der Sondenrohre von einer Haspel in die fertig gestellte Bohrung.	9
2.3	Prinzipskizze Wärmepumpe (nach HALOZAN & HOLZAPFEL, 1987).	10
2.4	Schematischer Aufbau einer Nervenzelle (links) und Verknüpfung mehrerer Nervenzellen (rechts), z.B. im Gehirn (natürliches neuronales Netz).	15
2.5	Schematische Darstellung eines Multi-Layer-Perceptron mit einer verdeckten Zwischenschicht, ebeneise vollständig verbunden. Die Verbindungen sind von unten nach oben gerichtet (<i>feedforward</i>), Informationen werden von der Eingabeschicht über die Zwischenschicht zur Ausgabeschicht propagiert.	16
2.6	Übliche Aktivierungs-/Ausgabefunktionen: Logistische Funktion (links) und tangens hyperbolicus (rechts) (nach ZELL, 1994).	18
2.7	Problem und Vermeidung des Overfittings. Links: Modellierung bivariater Daten. Gestrichelte Linie: Überanpassung, durchgezogene Linie: größerer Fehler der Trainingsdaten, aber bessere Generalisierung. Rechts: Entwicklung der Fehler von Trainings- und Testdaten mit Fortschritt des Trainings.	21

3.1	Vollständigkeit der Angaben von Gauß-Krüger-Koordinaten der Bohransatzpunkte.	29
3.2	Vorliegen und Vollständigkeit von Ausbauplänen.	29
3.3	Vollständigkeit der Angaben über verwendete Frostschutzmittel und deren Konzentration.	30
3.4	Dokumentation der Sondenabstände bei Anlagen mit mehreren Erdwärmesonden.	31
3.5	Dokumentierte Bohrlochdurchmesser.	32
3.6	Dokumentierte Sondenrohrdurchmesser.	32
3.7	Zusammenhang zwischen Rohrdurchmesser und Sondentiefe. Für tiefere Sonden werden ausschließlich größere Durchmesser (32 mm) verwendet.	33
3.8	Histogramm der Verpressquerschnitte in Prozent des Gesamtquerschnitts unter der Annahme, dass ein Verpressrohr mit 25 mm Durchmesser eingesetzt wurde.	33
3.9	Dokumentation der Komponenten der zur Hinterfüllung verwendeten Materialmischungen.	34
3.10	Dokumentation der Rezepturen mit Inhaltstoffen und Mengenverhältnissen für die Hinterfüllung.	35
3.11	Ansicht des Tabellenblatts <i>Erdwärmesonden</i> (hier Anlage 1071).	39
3.12	Histogramme der Sondenanzahl.	42
3.13	Histogramme der Sondentiefen.	43
3.14	Histogramme der Gesamtsondenlängen.	43
3.15	Verwendete Hinterfüllungen im deutschen Datensatz.	44
3.16	Histogramme der Frostschutzmittel-Konzentrationen.	45
3.17	Histogramme der geografischen Höhenlage.	46
4.1	Übersichtskarte der Schweiz mit Abgrenzung von Juragebirge, Mittelland und Alpen (nach LABHART, 1992).	48
4.2	Ablagerungsräume in der Tethys (a) und die heutige Abgrenzung der daraus entstandenen tektonischen Deckeneinheiten (b) (nach EISBACHER, 1996).	53
4.3	Übersichtskarte westliches Baden-Württemberg mit Ausdehnung von Schwarzwald und Oberrheingraben (nach GEYER & GWINNER (1991)).	55
5.1	Anzahl der Nennungen der Gesteinsarten in den Bohrprofilen (rot: geringe, blau: mittlere, grün: große Häufigkeit).	60

Abbildungsverzeichnis

5.2	Berechnung der normierten Soletemperatur aus der Abhängigkeit zwischen Außentemperatur und Soletemperatur. Links: bei guter Korrelation ($r = 0,92$) von Anlage 1109. Mittelwert der Soletemperatur: $2,6^{\circ}\text{C}$, normierte Soletemperatur = $3,4^{\circ}\text{C}$. Rechts: bei schlechter Korrelation ($r = 0,27$) von Anlage 1049. Mittelwert der Soletemperatur: $5,5^{\circ}\text{C}$, normierte Soletemperatur = $5,8^{\circ}\text{C}$	61
5.3	Zusammenhang zwischen Rohrdurchmesser und Tiefe der Erdwärmesonde. 40 mm Durchmesser werden erst für Sonden ab etwa 180 m Tiefe verwendet.	62
5.4	Zusammenhang zwischen topographischer Höhe und Jahresmitteltemperatur aller Anlagen.	63
6.1	Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen des besten Netzes aus IIa. Variablen: Warmwasserbereitung, geothermisch bereitgestellte Wärmemenge pro Jahr in kWh, Auslastungsgrad, Endteufe in m, Mächtigkeiten Bodentypen 01 und 04 in m. Legende siehe Abbildung 6.5	75
6.2	Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen des besten Netzes aus IIa. Variablen: Mächtigkeiten Bodentypen 05, 06, 07, 08, 12 und 13 in m. Legende siehe Abbildung 6.5.	77
6.3	Sensitivität BT07: Berechnete Soletemperaturen der Anlagen 1039 und 1057 mit Regressionsgeraden (oben) und Plots der Residuen (unten).	78
6.4	Sensitivität BT01: Berechnete Soletemperaturen der Anlagen 1055 und 1071 mit Regressionsgeraden (oben) und Plots der Residuen (unten).	79
6.5	Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse der Jahresmitteltemperatur des besten Netzes aus IIa. Rechts: Legende zu den Abbildungen 6.1, 6.2 und 6.5	80
6.6	Schematische Darstellung des Netzes a900 aus Analyseschritt IIId.	84

6.7	Plot der berechneten über den gemessenen Soletemperaturen. Dargestellt sind die mit KNN berechneten Werte als Punkte und die Regressionsgeraden für die KNN- und die EWS Berechnung (letztere von ERB et al. (2004)). Die durchgezogene Gerade repräsentiert das theoretische Optimum mit $m = 1$ und $b = 0^\circ\text{C}$. (RÜSGEN & CZURDA, 2006)	85
B.1	Geologische Übersichtskarte der Schweiz nach LABHART (1992).	109
B.2	Geologische Übersichtskarte von Südwestdeutschland (GEYER & GWINNER, 1991).	110

Tabellenverzeichnis

2.1	Mögliche spezifische Entzugsleistungen für Erdwärmesonden (VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE, 2001).	13
3.1	Kriterien zur Bewertung der Dokumentationen von Erdwärmesondenanlagen.	27
5.1	Codierung der Art der Warmwasserbereitung.	60
5.2	Eingabemuster der Hauptanalyseschritte	66
5.3	Variationen der Eingabeparameter für Sensitivitätsanalysen. . .	69
6.1	Fehler der Validierungsdaten der Netze, die mit unterschiedlich partitionierten Daten trainiert wurden (<i>ex in train</i> : Extremwerte aller Variablen den Trainingsdaten zugeordnet).	71
6.2	p-Werte aus dem Kruskal-Wallis-Test für 10 verschiedene, zufällige Partitionierungen im Mengenverhältnis 39:9:9.	72
6.3	Mittlere Quadratische Fehler (MSE) der besten Netze aus den Hauptanalyseschritten (Architektur 19-14-1 bedeutet: 19 Eingabeneuronen, 14 verdeckte Neuronen, 1 Ausgabeneuron). . .	73
6.4	Mittlere Steigungen \bar{m} der Regressionsgeraden aller Validierungsanlagen für die einzelnen Gesteinsarten in K pro m ($s =$ Standardabweichung).	76
7.1	Mögliche Zuordnung der Gesteine des Oberrheingrabens und der Grabenschultern (Kristallin ausgenommen) in die Klassifikation der neuronalen Netze.	92

1 Einleitung

1.1 Oberflächennahe Erdwärmennutzung zur Gebäudebeheizung

Zur Beheizung von Gebäuden stellt die Nutzung oberflächennaher Erdwärme heute oftmals eine ökologisch sinnvolle Alternative zu konventionellen Heizungssystemen dar. Bei entsprechenden Standortbedingungen und professioneller Planung und Auslegung bewirken die geringen Betriebskosten dieser Technologie, dass sich die im Vergleich höheren Investitionen nach einigen Jahren amortisieren. So ist diese Technologie auch heute bereits gegenüber herkömmlichen Systemen konkurrenzfähig.

Durch die Nutzung von Wärme, die unterhalb der Erdoberfläche gespeichert ist, können konventionelle Energieträger eingespart werden. Bei günstiger Auslegung werden drei Viertel der Wärme aus dem Untergrund gewonnen, ein Viertel muss durch die Kompressionsarbeit einer, meist mit Strom betriebenen Kompressionswärmepumpe zugeführt werden. Nimmt man Primärenergieverluste bei der Stromerzeugung in Höhe von etwa 65 % an, so bedeutet dies eine gesamte Ersparnis von Primärenergie von ca. 30 % gegenüber der direkten Nutzung fossiler Brennstoffe (Abb. 1.1). Laut dem Bundesverband Wärmepumpe (BWP) kann die Primärenergieeinsparung gegenüber dem herkömmlichen Ölkessel bis zu 40 % betragen (Gaskessel 42 %, Gasbrennwertkessel 30 %). Diese Einsparpotentiale setzen sich in der Verringerung des CO₂-Ausstoßes fort. Gegenüber einem Ölkessel können bis zu 53 % CO₂-Emissionen eingespart werden (BUNDESVERBAND WÄRMEPUMPE (BWP), 2005).

In Deutschland ist der Markt für erdgekoppelte Wärmepumpen in den letzten Jahren stark gewachsen. Nach Angaben des BWP wurden im Jahr 2006 insgesamt 43 886 Wärmepumpen zu Heizzwecken verkauft. Mehr als die Hälfte davon (24 195) waren Sole/Wasser-Wärmepumpen, also solche, die den Untergrund als Wärmequelle nutzen (Abb. 1.2). Dies entspricht im Vergleich zum

1 Einleitung

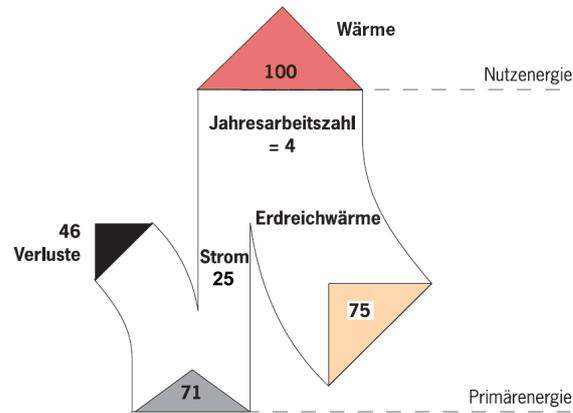


Abbildung 1.1: Energieflussdiagramm für die Kompressionswärmepumpe (nach IE, 1999).

Vorjahr einer Steigerung um über 100 %. Im Jahr 2005 wurden etwa 18 500 Geräte verkauft.

In den meisten Fällen wird die Untergrundwärme mit Hilfe von Erdwärmesonden erschlossen. Andere Quellensysteme können Erdreichkollektoren oder Grundwasserbrunnen sein. Erdwärmesonden stellen jedoch in vielen Fällen geringere Ansprüche an den Standort und werden daher oft bevorzugt. Erdreichkollektoren sind unter Umständen kostengünstiger zu installieren, benötigen aber größere unbebaute und möglichst sonnenbeschienene Flächen um ausreichend Wärme entziehen zu können. Bei der direkten Nutzung von Grundwasser durch Brunnenanlagen müssen spezielle hydrogeologische Bedingungen vorliegen, damit eine solche Lösung realisierbar wird. Der Flurabstand des Grundwassers sollte möglichst gering, das Grundwasserdargebot muss ausreichend sein und die Wasserqualität muss bestimmten Anforderungen genügen, damit die Funktion der Brunnen auf Dauer gewährleistet werden kann. Wo diese Bedingungen erfüllt werden, können mit der direkten Grundwassernutzung sehr effiziente Anlagen betrieben werden, da das nutzbare Temperaturniveau relativ hoch liegt. Erdwärmesonden sind heute in der Praxis am weitesten verbreitet, da sie im Gegensatz zu Grundwasserbrunnen in vielfältigen Untergrundverhältnissen realisierbar sind und außerdem keiner regelmäßigen Wartung bedürfen. Bei größeren Bauobjekten, wie zum Beispiel Bürogebäuden, können oft auch erdberührte Bauteile (z.B. Pfahlgründungen) geothermisch

1.2 Problemstellung und Zielsetzung

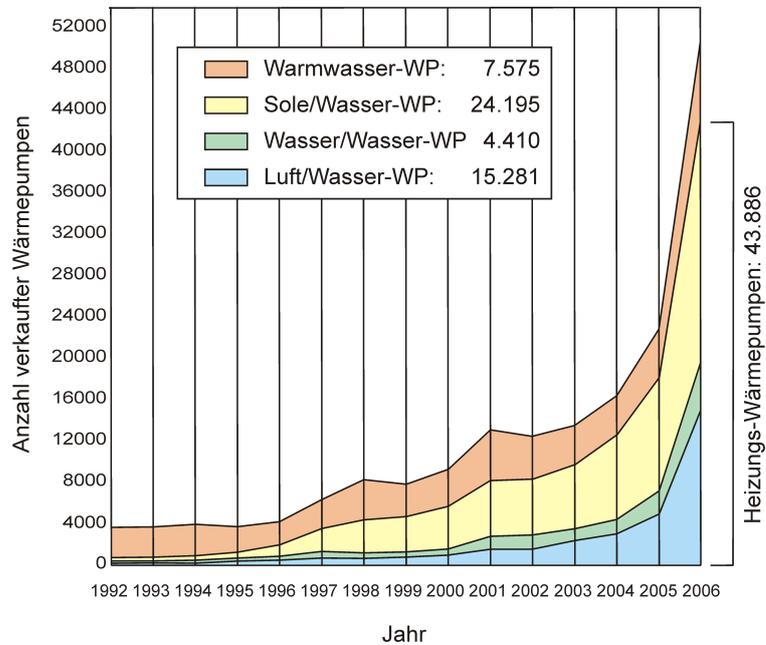


Abbildung 1.2: Marktentwicklung für Wärmepumpen seit 1992 (nach Angaben des BUNDESVERBAND WÄRMEPUMPE (BWP) (2007)).

genutzt werden. Die große Oberfläche der unterirdischen Bauteile wird dabei genutzt, um dem oberflächennahen Untergrund Wärme zu entziehen. Dafür werden Kunststoffrohre zum Beispiel in Gründungspfähle integriert und von einer Wärmeträgerflüssigkeit durchströmt. Diese Flüssigkeit entzieht dem Untergrund die Wärme, die dann zum Heizen genutzt werden kann.

1.2 Problemstellung und Zielsetzung

Damit erdgekoppelte Wärmepumpenheizungen langfristig zuverlässig und energiesparend funktionieren, muss jede Anlage individuell geplant und ausgelegt werden. Dies erfordert eine gewissenhafte Abstimmung der einzelnen Systemkomponenten aufeinander. Das heißt Wärmequelle (Erdwärmesonde), Wärmepumpe und Wärmesenke (Verteilersystem) müssen realistisch und dem

1 Einleitung

Nutzerverhalten entsprechend dimensioniert werden, miteinander im Einklang stehen und sich zu einem angepassten Gesamtsystem zusammenfügen.

Zur Auslegung von Erdwärmesonden gibt es verschiedene Methoden und Werkzeuge, die unter anderem in der VDI-Richtlinie 4640 „Thermische Nutzung des Untergrundes“, Blatt 2: „Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen“ (VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE, 2001) beschrieben werden. Besonders für Kleinanlagen werden in der Regel stark vereinfachte Ansätze oder Faustformeln verwendet, um den Planungsaufwand und damit die Kosten möglichst gering zu halten. Dadurch kann es zu Über- oder Unterdimensionierungen kommen. Eine Unterdimensionierung kann vom Betreiber unter Umständen unbemerkt bleiben, da sich in erster Linie der Strombedarf der Anlage erhöhen, jedoch weiterhin Wärme bereitgestellt werden würde. Eine starke Unterkühlung der Sonde kann zum Gefrieren der unmittelbaren Sondenumgebung führen. Da die meisten Sonden mit Frostschutzmitteln im Sondenfluid betrieben werden, können Fluidtemperaturen deutlich unterhalb des Gefrierpunktes auftreten. Durch das Gefrieren der Sondenumgebung entstehen im Einzelfall irreversible Schäden an der Sonde und in deren näherer Umgebung, wodurch die Funktion der Sonde und der Grundwasserschutz nicht mehr gewährleistet werden können (HERRMANN & CZURDA, 2007). Eine Überdimensionierung bedeutet dagegen immer erhöhte Investitionen und kann dadurch ein grundsätzliches Hemmnis der Technologie darstellen. Aus ökologischer Sicht führt eine Überdimensionierung außerdem zur stärkeren Beanspruchung natürlicher Ressourcen. Der Eingriff in Boden und Grundwasser könnte in diesem Fall durch optimale Dimensionierung verringert sowie Energie und Material für den Ausbau gespart werden.

Daher ist es wünschenswert, neue methodische Ansätze zu entwickeln, die auch bei geringem Aufwand zuverlässigere Prognosen planungsrelevanter Parameter leisten können. Es ist notwendig, auch für Kleinanlagen Mittel bereitzustellen, mit denen die Planungssicherheit erhöht werden kann. Diese Methoden sollten daher einfach und schnell anwendbar sein und aus möglichst wenigen Planungsgrößen eine verlässliche Sondendimensionierung ermöglichen.

In der vorliegenden Arbeit werden künstliche neuronale Netze hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit für das beschriebene Problem untersucht. Diese Werkzeuge aus dem Bereich der künstlichen Intelligenz sind besonders für nichtlineare multivariate Probleme geeignet. Fertig entwickelte künstliche neuronale Netze zeichnen sich durch ihre schnelle und zuverlässige Anwendbarkeit aus und

sind hinsichtlich der Präzision der Ergebnisse klassischen statistischen Methoden oft überlegen.

Die Leistungsfähigkeit von Erdwärmesondenanlagen hängt von der Untergrundbeschaffenheit und dem Zusammenspiel mit der Heizungsanlage ab. Prognosen über die Effizienz basieren in der Regel auf physikalischen Modellen, die mit Hilfe geometrischer Vereinfachungen oder numerischer Berechnungen angewendet werden. Mit künstlichen neuronalen Netzen werden dagegen lediglich quantitative Abhängigkeiten in realen Daten analysiert, ohne jedoch präzise physikalische Gesetzmäßigkeiten vorzugeben. Dadurch werden natürliche Unschärfen und verdeckte Muster automatisch in die Zusammenhänge mit einbezogen. Der Unterschied der Vorgehensweisen dieser zwei Ansätze ist in Abb. 1.3 schematisch dargestellt.

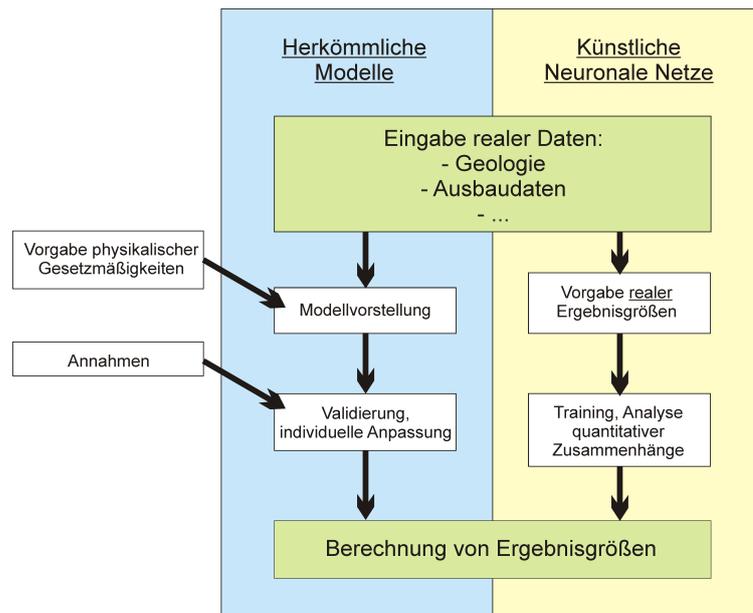


Abbildung 1.3: Vorgehensweise der klassischen Modellierung (links) und der Methodik der neuronalen Netze (rechts).

1.3 Aufbau der vorliegenden Arbeit

Im Folgenden werden zunächst die zum Verständnis der Arbeit notwendigen theoretischen Grundlagen erläutert (Kapitel 2). In Kapitel 3 wird der allgemeine Stand der Datenerhebung von Erdwärmesondenanlagen erörtert. Eine eigene Erhebung von Daten der unteren Verwaltungsbehörden ist Gegenstand des Abschnitts 3.2 und im Abschnitt 3.3 wird die Datengrundlage aus der Schweiz zum Training neuronaler Netze vorgestellt. In 3.4 wird ein Vergleich zwischen deutschen und schweizer Anlagendaten angestellt.

Das Kapitel 4 dient der Vorstellung der geologischen Verhältnisse der Schweiz und der Vergleichsregionen Schwarzwald und Oberrheingraben. Hierbei werden vor allem die relevanten Merkmale der Stratigraphie und Lithologie berücksichtigt.

Die Methoden zum Training und zur Netzwerkoptimierung werden in Kapitel 5, die Ergebnisse dessen in Kapitel 6 dargestellt.

Abschließend werden alle Ergebnisse der Arbeit in der Diskussion (Kapitel 7) intensiv erörtert. Hierbei werden besonders Fragen der Modellgenauigkeit sowie der allgemeinen und regionalen Übertragbarkeit behandelt. Darüber hinaus werden weitere Anwendungsmöglichkeiten und allgemeine Potentiale der Methodik für die oberflächennahe Geothermie diskutiert.

In Kapitel 8 werden die wesentlichen Ergebnisse und Thesen dieser Arbeit in einem Überblick zusammengefasst.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Funktionsweise einer Erdwärmeheizung

Technische Anlagen zur Nutzung der Geothermie für die Beheizung von Gebäuden bestehen aus drei wesentlichen Einheiten: der Wärmequelle, der Wärmepumpe und dem Wärmeverteilungssystem, das die Wärmesenke darstellt (Abb. 2.1). In Abb. 2.1 dient eine Erdwärmesonde zur Wärmequellenerschließung. Zur Wärmeverteilung sind Niedertemperaturheizungen wie Fußbodenheizungen hinsichtlich der Effizienz der gesamten Anlage am günstigsten. Prinzipiell können Geothermie-Heizungen aber auch mit anderen Systemen mit höheren Vorlauftemperaturen, z.B. Radiatoren betrieben werden. Zwischen den einzelnen Kreisläufen der drei Einheiten besteht kein Massen-, lediglich ein Wärmeaustausch.

Für den Bau einer Erdwärmesonde werden zunächst eine oder mehrere Bohrungen der erforderlichen Sondenlänge abgeteuft, in die anschließend, wie in Abb. 2.2 zu sehen, Wärmetauscher-Rohre eingebaut werden. In der Praxis haben sich sogenannte Doppel-U-Rohr-Sonden durchgesetzt. Diese bestehen aus zwei haarnadelförmigen U-Rohren aus Polyethylen hoher Dichte (HDPE). Andere Sondengeometrien wie Koaxialsonden (KALTSCHMITT et al., 2003) sind allenfalls von untergeordneter Bedeutung. Typische Sondenlängen liegen zwischen 80 m und 100 m. Bei entsprechenden geologischen Verhältnissen werden aber auch größere Tiefen (z.B. bis 250 m) erschlossen.

Der Ringraum um die Sondenrohre wird mit geeigneten Baustoffen verfüllt (meist Zement-Bentonit-Suspensionen, evtl. mit weiteren Zuschlägen), damit ein schlüssiger Kontakt zum Nebengestein hergestellt wird. Nur so ist auch im trockenen Untergrund ein guter Wärmeentzug durch Wärmeleitung möglich. Darüber hinaus muss durch die Hinterfüllung gewährleistet sein, dass die entstandenen Wasserwegsamkeiten für Oberflächen- und Grundwasser wieder abgedichtet werden (u.a. VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE, 2001; LGRB, 2005; HOHBERGER et al., 2002; BUNDESVERBAND WÄRMEPUMPE

2 Theoretische Grundlagen

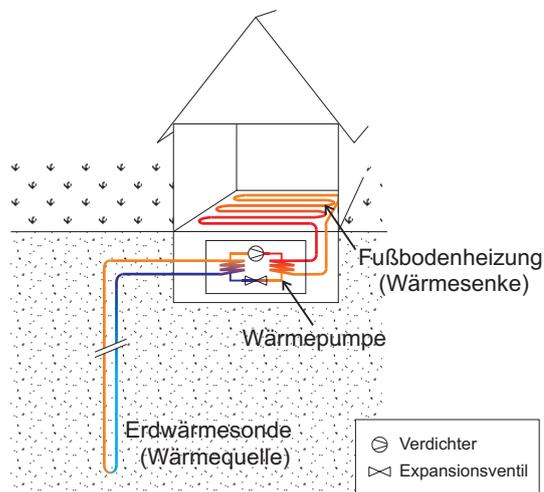


Abbildung 2.1: Prinzipskizze einer Erdwärme-Heizungsanlage für ein Einfamilienhaus.

(BWP), 2003). Spezielle thermisch verbesserte Baustoffe versprechen einen optimierten Wärmezug durch bessere Wärmeleitung vom umgebenden Gestein zur Erdwärmesonde (HERRMANN, 2003; RÜSGEN, 2003; HERRMANN et al., 2004). Die chemische und physikalische Beständigkeit solcher Materialien ist zur Zeit noch ein wesentlicher Gegenstand der Forschung (HERRMANN & CZURDA, 2007).

In den Sondenrohren zirkuliert Wasser, das in den meisten Fällen mit Frostschutzmittel versetzt wird. Als Frostschutz können Salzlösungen oder Alkohole verwendet werden. Obwohl sich in der Praxis 25- bis 30-prozentige Alkohol-Wasser-Gemische durchgesetzt haben, wird die Flüssigkeit in den Sondenrohren häufig als „Sole“ bezeichnet, auch wenn es sich nicht um Salzlösungen handelt. Im Folgenden wird daher für die Wärmeträgerflüssigkeit in der Sonde ebenfalls die Bezeichnung „Sole“ oder allgemein „Fluid“ verwendet. Das Fluid wird im Untergrund aufgewärmt und liefert diese Wärme an die Wärmepumpe. Dabei wird es abgekühlt und tritt mit niedrigeren Temperaturen wieder in den Untergrund ein, wo eine erneute Erwärmung erfolgen kann.

2.1 Funktionsweise einer Erdwärmehheizung



Abbildung 2.2: Einbau der Sondenrohre von einer Haspel in die fertig gestellte Bohrung.

In der Wärmepumpe sorgt die gelieferte Erdwärme dafür, dass an einem Wärmetauscher ein Arbeitsmittel mit sehr niedrigem Siedepunkt verdampft wird (Abb. 2.3, ①). Dabei wird Energie in den Kreislauf der Wärmepumpe aufgenommen. Anschließend wird das Arbeitsmittel komprimiert (Abb. 2.3, ②) und im Verflüssiger (Abb. 2.3, ③) wieder kondensiert. Dabei wird das Temperaturniveau soweit erhöht, dass die notwendigen Vorlauftemperaturen des Verteilersystems bereitgestellt werden können. Am Verflüssiger wird die Wärme über einen Wärmetauscher an den Vorlauf der Heizung abgegeben, das Arbeitsmittel wird abgekühlt. Bei der anschließenden Entlastung (Abb. 2.3, ④) wird die Temperatur des Arbeitsmittels nochmals verringert und es kann am wärmequellenseitigen Wärmetauscher wieder Wärme aufgenommen werden.

Die Effizienz einer Wärmepumpe wird im Allgemeinen durch die Leistungsziffer ε beschrieben. Diese beschreibt das Verhältnis von bereitgestellter, nutzbarer Wärmeleistung P_{th} zu eingesetzter elektrischer Leistung P_{el} .

$$\varepsilon = \frac{P_{th}}{P_{el}} \quad (2.1)$$

2 Theoretische Grundlagen

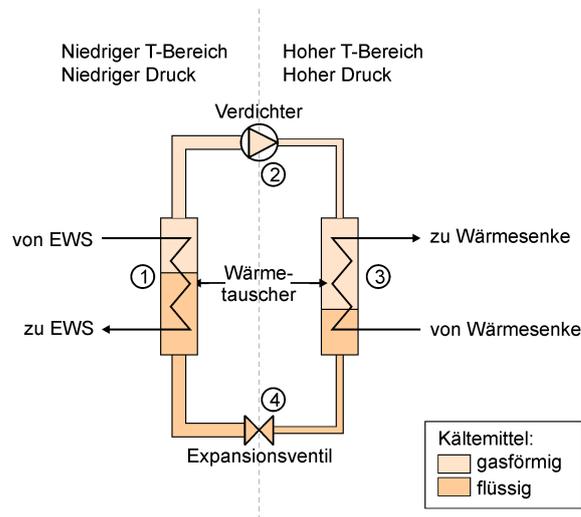


Abbildung 2.3: Prinzipskizze Wärmepumpe (nach HALOZAN & HOLZAPFEL, 1987).

Diese Kennziffer beschreibt also den momentanen Leistungszustand zu Wärmepumpe. Zur Beurteilung der Effizienz über festgelegte Zeitintervalle dient im Allgemeinen die Arbeitszahl. Diese berechnet sich aus dem Quotienten von bereitgestellter Wärme und zugeführter elektrischer Arbeit im betrachteten Zeitraum. In der Praxis werden Wärmepumpen häufig durch die Jahresarbeitszahl charakterisiert, die dieses Verhältnis von Wärme und Antriebsarbeit über den Zeitraum von einem Jahr beschreibt.

$$JAZ = \frac{Q_{th_a}}{Q_{el_a}} \quad (2.2)$$

JAZ Jahresarbeitszahl

Q_{th_a} jährlich bereitgestellte Wärmemenge

Q_{el_a} jährlich aufgewendete Antriebsarbeit

Setzt man den verlustfreien Carnot-Prozess¹ voraus, kann die Leistungszi-

¹ Bei der Beschreibung des Carnot-Prozesses wird angenommen, dass ein Prozess vollkommen ohne Verluste und dadurch mit dem größtmöglichen Wirkungsgrad abläuft.

2.1 Funktionsweise einer Erdwärmeheizung

fer auch nach folgender Formel berechnet werden (VON CUBE & STEIMLE, 1984):

$$\varepsilon_c = \frac{T_{VL}}{T_{VL} - T_Q} \quad (2.3)$$

ε_c Leistungsziffer unter Voraussetzung von Carnot
 T_{VL} Vorlauftemperatur Heizung
 T_Q Quelltemperatur

Grundsätzlich befindet sich die Wärmepumpentechnik daher in dem unumgänglichen Dilemma, dass die Leistungszahl unmittelbar vom zu leistenden Temperaturhub $T_{VL} - T_Q$ abhängt. Je größer die Temperaturdifferenz von Wärmesenke (Heizungsvorlauf) und Wärmequelle (Sondenfluid) ist, umso kleiner ist die Leistungsziffer, das heißt umso schlechter die Effizienz der Anlage. Besonders bei sehr niedrigen Außentemperaturen, wenn der Heizbedarf am größten ist, sinkt daher die Leistungsziffer der Wärmepumpe. Prinzipiell ist daher anzustreben, den erforderlichen Temperaturunterschied möglichst gering zu halten, um die Wärmepumpe so stromsparend wie möglich zu betreiben. Dazu sollte die Wärmequellentemperatur möglichst hoch und die Vorlauftemperatur der Heizung möglichst niedrig sein. Daher erklären sich unter anderem die Leistungsunterschiede zwischen den Luft/Wasser-, Wasser/Wasser- (Grundwasserwärmepumpen) und Sole/Wasser-Wärmepumpen (erdreichgekoppelte Wärmepumpen). Die verschiedenen Systeme zur Wärmequellenerschließung liefern unterschiedlich hohe Quelltemperaturen. Hinsichtlich der Wärmeverteilung sind aufgrund des beschriebenen Sachverhalts solche Systeme zu bevorzugen, die möglichst niedrige Vorlauftemperaturen benötigen. Hierzu zählen unter anderem Fußbodenheizung, Betonkerntemperierung oder Flächenheizungen, die zum Beispiel auf Wände aufgebracht werden.

Details zur Wärmepumpentechnik und den thermodynamischen Grundlagen finden sich u.a. bei KIRN (1983) und VON CUBE & STEIMLE (1984).

2.2 Herkömmliche Methoden zur Untergrundbewertung

Zur Planung und Auslegung einer Erdwärmesondenanlage wäre eine vollständige Simulation des Wärmeentzugs aus dem Untergrund unter Berücksichtigung von Wärmeleitung und konvektivem Wärmetransport durch Grundwasser die optimale Grundlage. Solche aufwändigen Untergrundmodelle, die Strömungs- und Wärmestrommodelle beinhalten, sind jedoch nur in Einzelfällen realisierbar, wenn es sich um große Anlagen mit hohen Wärmeleistungen und eventuellen Kühllasten handelt (ONDREKA et al., 2007). Nur bei Großprojekten können derart aufwändige Planungsschritte durchgeführt und finanziell gerechtfertigt werden. Für die Modellierung des Wärmeentzugs und der Temperaturentwicklung im Untergrund stehen zahlreiche Software-Lösungen zur Verfügung (SIGNORELLI, 2004; CHIASSON, 1999). Sowohl die Methoden der Finiten Differenzen, als auch der Finiten Elemente werden hier genutzt.

Darüber hinaus gibt es weitere Programme, die auf analytischen Ansätzen oder Parameterstudien basieren. Ein häufig verwendeter analytischer Ansatz ist die Kelvin'sche Linienquellentheorie, die für diese Anwendung zum ersten Mal von GUERNSEY et al. (1949) beschrieben wurde. In Deutschland und einigen anderen europäischen Ländern ist zur Auslegung einzelner Sonden und größerer Sondenfelder besonders der anwenderfreundliche Earth Energy Designer (EED) von Blocon (HELLSTRÖM & SANNER, 1994; HELLSTRÖM & SANNER, 2000) weit verbreitet. Im Auftrag des Schweizer Bundesamtes für Energie wurde das ebenfalls sehr bedienerfreundliche Programm EWS (HUBER & SCHULER, 1997; HUBER & PAHUD, 1999) entwickelt, das in der Schweiz häufig zur Auslegung genutzt wird. Wichtiger Bestandteil beider Programme sind die von Eskilson entwickelten *g-functions* (ESKILSON, 1986, 1987).

Für kleinere Anlagen mit geringeren Heizleistungen, wie z.B. Einfamilienhäuser, werden häufig sehr einfache Auslegungsmethoden genutzt. Hierzu gibt es Nomogramme, tabellierte Werte der spezifischen Entzugsleistung verschiedener Gesteinsarten (z.B. VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE, 2001) oder Faustformeln. Die Anwendung bestimmter Richtwerte für mögliche spezifische Entzugsleistungen verschiedener Gesteine (Tab. 2.1) ist in der Praxis sehr beliebt, da diese Methode schnell und einfach anzuwenden ist. Hierbei muss aber unbedingt beachtet werden, dass diese Werte nur realistisch sind, wenn verschiedene Grundvoraussetzungen erfüllt sind. So muss der Ausbau der Sonde hinsicht-

2.2 Herkömmliche Methoden zur Untergrundbewertung

Tabelle 2.1: Mögliche spezifische Entzugsleistungen für Erdwärmesonden (VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE, 2001).

Untergrund	Entzugsleistung in $\frac{W}{m}$	
	1800 h	2400 h
<i>Allgemeine Richtwerte:</i>		
Schlechter Untergrund (trockenes Sediment) ($\lambda < 1,5 \frac{W}{m \cdot K}$)	25	20
Normaler Festgesteins-Untergrund und wasser- gesättigtes Sediment ($\lambda = 1,5-3,0 \frac{W}{m \cdot K}$)	60	50
Festgestein mit hoher Wärmeleitfähigkeit ($\lambda > 3,0 \frac{W}{m \cdot K}$)	84	70
<i>Einzelne Gesteine:</i>		
Kies, Sand, trocken	< 25	< 20
Kies, Sand, wasserführend	65-80	55-65
Bei starkem Grundwasserfluss in Kies und Sand, für Einzelanlagen	80-100	80-100
Ton, Lehm, feucht	35-50	30-40
Kalkstein (massiv)	55-70	45-60
Sandstein	65-80	55-65
saure Magmatite (z.B. Granit)	65-85	55-70
basische Magmatite (z.B. Basalt)	40-65	35-55
Gneis	70-85	60-70

(λ : Wärmeleitfähigkeit)

lich Bohrdurchmesser, Sondengeometrie und Sondenabständen bei mehreren Sonden bestimmten Anforderungen genügen. Die Zahl der Betriebsstunden pro Jahr ist auf 1800 oder 2400 festgelegt. Hierbei handelt es sich um Richtwerte für die Wärmebereitstellung ohne (1800 h) oder mit (2400 h) Warmwasserbereitung (Einzelheiten zu den Vorgaben sind der VDI-Richtlinie 4640 Blatt 2 (2001) zu entnehmen). Die möglichen Entzugsleistungen sind so berechnet, dass im Dauerbetrieb der Anlage die Temperaturdifferenz zwischen der Sole und dem ungestörten Erdreich nicht mehr als 11 K, bei Spitzenlasten nicht mehr als 17 K beträgt. Bei Anwendung dieser Tabellenwerte kann der Planer also nur in einem sehr engen Rahmen die Anlagenkonfigurationen variieren. Wird von den Vorgaben abgewichen, kann die Auswirkung auf die Effizienz der Sonde nur mit zusätzlichen Planungsmitteln abgeschätzt werden. Eine ergänzende Methode hierfür wurde zum Beispiel von KOENIGSDORFF (2007) vorgestellt.

Prinzipiell gilt, dass bei geringerem Planungsaufwand stärkere Vereinfachungen und mehr Annahmen in die Planung eingehen müssen. Je präziser eine Methode ist, um so größer ist in der Regel der Aufwand. Bei kleineren Anlagen würden präzise Modellierungen den finanziellen und zeitlichen Rahmen der Planung sprengen, weshalb gewisse Unsicherheiten in Kauf genommen werden und im Zweifelsfall Sicherheitszuschläge einkalkuliert werden. Die VDI-Richtlinie 4640 „Thermische Nutzung des Untergrundes“ gibt in Blatt 2 „Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen“ (VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE, 2001) eine Übersicht über verschiedene Verfahren und Empfehlungen zu deren Anwendungsbereichen.

2.3 Künstliche neuronale Netze

2.3.1 Das biologische Vorbild

Künstliche neuronale Netze (KNN) sind Werkzeuge aus dem Bereich der Künstlichen Intelligenz zur Lösung komplexer Probleme. Besonders für multivariate, nichtlineare Zusammenhänge bieten sie großes Potential. Das Vorbild künstlicher neuronaler Netze sind natürliche neuronale Netze, also Nervensystem und Gehirn. Sie ahmen die Art der Informationsverarbeitung dieser biologischen Strukturen nach. Herkömmliche Algorithmen arbeiten nach festgelegten, z.B. physikalisch motivierten Modellen, um ein Ergebnis zu erzielen.

Künstliche neuronale Netze stellen dagegen flexible mathematische Modelle dar, die komplexe Zusammenhänge eigenständig entsprechend vorgegebener Lernregeln erlernen und mit Hilfe dieses „antrainierten Wissens“ bestimmte Aufgaben lösen können (ROJAS, 1996).

Im Gehirn findet die Informationsverarbeitung in einer Vielzahl kleiner Einheiten, den Nervenzellen, statt. Diese sind untereinander vielfältig verknüpft und geben Informationen durch zahlreiche Schichten hindurch weiter (Abb. 2.4). Wenn bestimmte Sachverhalte erlernt werden, findet dies in erster Linie durch die Anpassung der Verknüpfungen statt. Die Verbindungen zwischen den Nervenzellen können Impulse hemmen oder verstärken oder unterhalb eines gewissen Schwellenwertes gar vollständig unterdrücken.

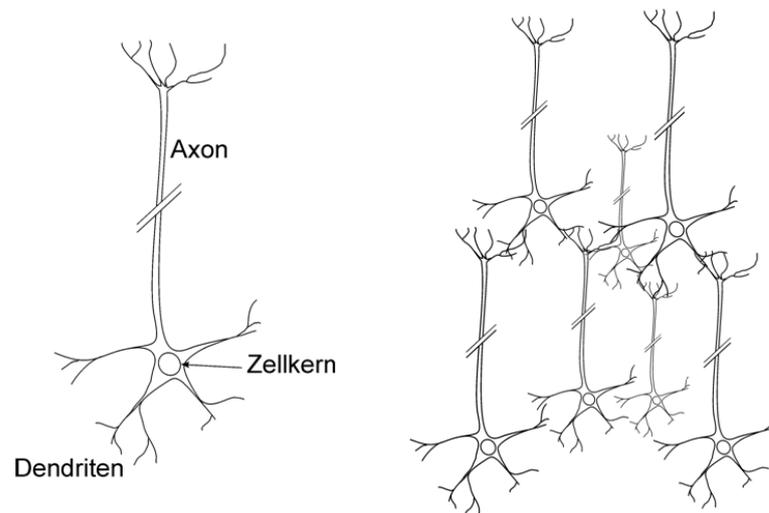


Abbildung 2.4: Schematischer Aufbau einer Nervenzelle (links) und Verknüpfung mehrerer Nervenzellen (rechts), z.B. im Gehirn (natürliches neuronales Netz).

Für die Geowissenschaften wurden künstliche neuronale Netze bereits in verschiedenen Bereichen in Forschungsarbeiten angewendet (z.B. KUMAR et al., 2000; MAYORAZ & VULLIET, 2002; LEE et al., 2003; NEAUPANE & ACHET, 2004). Am Lehrstuhl für Angewandte Geologie Karlsruhe wurde in den letzten Jahren in zwei abgeschlossenen Dissertationen das Potential der Methodik bestätigt (FERNÁNDEZ-STEEGER, 2002; LIESCH, 2006).

2.3.2 Aufbau künstlicher neuronaler Netze

In künstlichen neuronalen Netzen stellt das sogenannte Neuron die kleinste informationsverarbeitende Einheit dar (auch als Knoten oder Zelle bezeichnet). Die Neuronen sind in Schichten angeordnet und die Informationsverarbeitung verläuft von einer Eingabeschicht über eine oder mehrere Zwischenschichten zur Ausgabeschicht. Eine Zwischenschicht wird oft auch als verdeckte oder hidden-Schicht bezeichnet, da ihre Funktionsweise nicht dargestellt wird und sie keine realen Parameter oder Sachverhalte repräsentiert. Die Neuronen sind miteinander verbunden, wobei es verschiedene Arten der Verbindung gibt. In der Regel handelt es sich um gerichtete Verbindungen zwischen zwei aufeinanderfolgenden Schichten. Es sind aber auch Verbindungen über mehrere Schichten hinweg, sog. shortcut-connections, Verbindungen innerhalb einer Schicht oder Rückkopplungen möglich (ZELL, 1994). Eine häufig genutzte Variante der neuronalen Netze ist das *Multi-Layer-Perceptron*. Dabei handelt es sich um mehrschichtige Netzwerke mit gerichteten, gewichteten Verbindungen, die in den meisten Fällen ebeneisweise vollständig verbunden sind und keine Rückkopplungen enthalten. Abb. 2.5 zeigt eine schematische Darstellung eines solchen neuronalen Netzes.

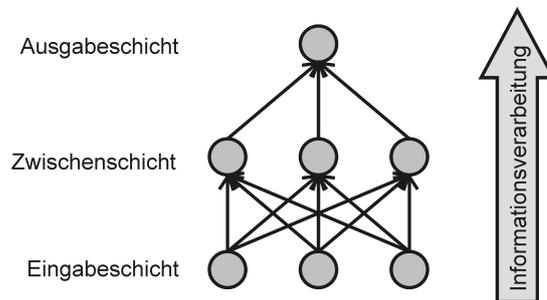


Abbildung 2.5: Schematische Darstellung eines Multi-Layer-Perceptron mit einer verdeckten Zwischenschicht, ebeneisweise vollständig verbunden. Die Verbindungen sind von unten nach oben gerichtet (*feedforward*), Informationen werden von der Eingabeschicht über die Zwischenschicht zur Ausgabeschicht propagiert.

Jedes Neuron j in einem Netz besitzt zum Zeitpunkt t einen bestimmten *Aktivierungszustand* $a_j(t)$ (auch einfach *Aktivierung* genannt). Dieser berechnet sich aus der alten Aktivierung und der *Netzeingabe* $net_j(t)$ entsprechend der

Aktivierungsfunktion f_{act} :

$$a_j(t+1) = f_{act}(a_j(t), net_j(t), \theta_j) \quad (2.4)$$

θ bezeichnet einen fakultativen Schwellenwert. Aus der Aktivierung wird über die Ausgabefunktion f_{out} die Ausgabe o_j der Zelle berechnet:

$$o_j = f_{out}(a_j) \quad (2.5)$$

Oft entspricht die Ausgabe auch der Aktivierung, so dass die Ausgabefunktion entfällt. Die Ausgabe geht wiederum in die Berechnung der Netzeingabe $net_j(t)$ ein:

$$net_j(t) = \sum_i o_i(t) w_{ij} \quad (2.6)$$

Die Netzeingabe für das Neuron j berechnet sich also aus den Ausgaben der Vorgängerneuronen und den Verbindungsgewichten w_{ij} .

Als Aktivierungs- und Ausgabefunktionen kommen verschiedene Funktionen in Frage. Im einfachsten Fall kann die Aktivierung binär codiert sein. In der Regel wird eine Codierung im Zahlenbereich $[0,1]$ oder $[-1,1]$ gewählt. Es gibt jedoch auch Modelle, die mit beliebigen Zahlenbereichen rechnen (ZELL, 1994). Am häufigsten rechnet man mit Sigmoid-Funktionen, die bei betragsmäßig kleinen Werten um 0 die größte Steigung besitzen und sich nahezu linear verhalten. Die logistische Funktion (Glg. 2.7) liefert Ausgaben im Intervall $]0,1[$, der tangens hyperbolicus (Glg. 2.8) in $] -1,1[$ (Abb. 2.6).

$$f_{log} = \frac{1}{1 + \exp(-x)} \quad (2.7)$$

$$f_{tanh} = \tanh(x) \quad (2.8)$$

Der Vorgang des Lernens findet statt, indem üblicherweise die Gewichte zwischen den Neuronen so angepasst werden, dass der Zusammenhang zwischen Eingaben und Ausgaben möglichst genau abgebildet werden kann. Wie diese Anpassung vorgenommen wird, bestimmt der *Lernalgorithmus* (vgl. Abschnitt 2.3.3).

2 Theoretische Grundlagen

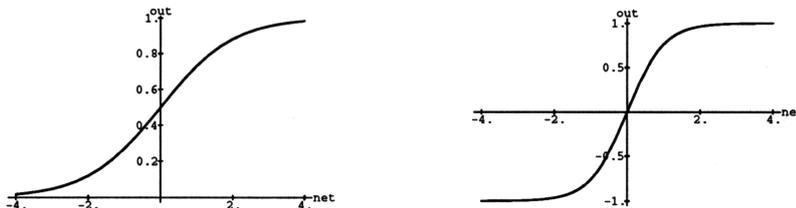


Abbildung 2.6: Übliche Aktivierungs-/Ausgabefunktionen: Logistische Funktion (links) und tangens hyperbolicus (rechts) (nach ZELL, 1994).

Die Anzahl der Schichten und Neuronen in einem künstlichen neuronalen Netz ist stark von der jeweiligen Aufgabenstellung abhängig. Die Eingabeschicht enthält all diejenigen Parameter, die als unabhängige Variablen Einfluss auf die Ergebnisgröße haben. Die Zusammenstellung dieses Eingabevektors erfordert häufig bereits detaillierte Kenntnisse des zu untersuchenden Sachverhalts und kann durch herkömmliche statistische Methoden (Korrelationsanalysen, Hauptkomponentenanalysen) unterstützt werden. Korrelationen innerhalb des Eingabevektors sollten vermieden werden. Die Ergebnisgröße oder -größen werden von den Neuronen der Ausgabeschicht repräsentiert. Bei Klassifikationsproblemen kann zum Beispiel für jede vorkommende Klasse ein Neuron gesetzt werden, während bei der Abbildung stetiger Funktionen das Ergebnis oft von einem Ausgabeneuron repräsentiert wird.

Die Anzahl der Zwischenschichten und verdeckten Neuronen muss in der Regel individuell für jedes Problem erprobt werden. Für die Wahl dieser *Architektur* oder *Topologie* gibt es verschiedene empirische Grundsätze, letztendlich muss aber nach dem Prinzip des „*trial and error*“ die optimale Konstellation gefunden werden. Dieses Optimum stellt das kleinstmögliche Netzwerk dar, das das gestellte Problem noch mit hinreichender Genauigkeit abbilden kann (MAIER & DANDY, 2000).

Ohne verdeckte Zwischenschicht geht die Fähigkeit der Modellierung nicht-linearer Zusammenhänge verloren. Lineare Probleme können aber mit Netzen ohne Zwischenschicht abgebildet werden. HORNIK et al. (1989) und auch HECHT-NIELSEN (1989) konnten zeigen, dass die Verwendung einer einzigen verdeckten Schicht zur Berechnung beliebiger Funktionen ausreichend ist.

In der Praxis können sehr komplexe Probleme allerdings mit zwei oder mehr verdeckten Zwischenschichten aufgrund der höheren Flexibilität der Netze oft schneller und effektiver angepasst werden (FLOOD & KARTAM, 1994).

Hinsichtlich der verdeckten Neuronen beschreiben MAREN et al. (1990), dass die optimale Anzahl oft unter der der Eingabeneuronen liegt. Für kontinuierliche Ausgabefunktionen empfehlen die Autoren zwei Zwischenschichten, wobei das Verhältnis der hidden-Neuronen zwischen erster und zweiter Schicht etwa 3:1 betragen sollte. Außer der Zahl der Eingabeparameter spielt die Zahl der verwendeten Trainingsmuster eine Rolle. Die Zahl der Verbindungsgewichte, also der Freiheitsgrade, sollte im Allgemeinen kleiner sein, als die der Trainingsmuster. Die Angaben zur Größe dieses Verhältnisses variieren bei den verschiedenen Autoren zwischen < 1 und $\frac{1}{30}$ (u.a. ROGERS & DOWLA, 1994; WEIGEND et al., 1990; AMARI, 1997).

2.3.3 Training neuronaler Netze

Das Training neuronaler Netze bedeutet eine Anpassung der Gewichtungen der Netzwerk-Verbindungen, so dass sie ein möglichst optimales Ergebnis liefern. Beim *überwachten Lernen* werden dafür bekannte Ergebnisse vorgegeben und die Netzausgabe mit dem angestrebten Ergebnis verglichen. Je nach Differenz werden dann die Gewichte iterativ angepasst, um den Ausgabefehler zu minimieren. Neben dem überwachten Lernen gibt es noch die Möglichkeiten des *unüberwachten* und des *bestärkenden Lernens*. Da diese für die vorliegende Arbeit nicht von Bedeutung sind, wird darauf an dieser Stelle nicht weiter eingegangen.

Die Anpassung der Gewichte erfolgt nach bestimmten Lernregeln. Das bekannteste Verfahren ist das *Backpropagation*. Stellt man den Fehler der Ausgabe als Funktion der Gewichte des Netzes dar, so versucht das Lernverfahren die Gewichte so zu verändern, dass in Richtung des größten Gradienten der Fehlerfunktion möglichst schnell das Minimum der Funktion erreicht wird (ZELL, 1994). Die allgemeine Backpropagation-Regel wird folgendermaßen formuliert:

$$\Delta w_{ij} = \eta o_i \delta_j \quad (2.9)$$

Hierin sind

Δw_{ij}	Änderung des Verbindungsgewichtes zwischen den Neuronen i und j
η	Lernfaktor oder Schrittweite
o_i	Ausgabe des Neurons i
δ_j	Fehlersignal des Neurons j

Das Fehlersignal δ_j wird unterschiedlich berechnet, je nach dem ob es sich bei j um ein verdecktes oder ein Ausgabeneuron handelt:

$$\delta_j = \begin{cases} f'_{act}(net_j)(t_j - o_j) & \text{falls j Ausgabeneuron} \\ f'_{act}(net_j) \sum_k \delta_k w_{jk} & \text{falls j verdecktes Neuron} \end{cases} \quad (2.10)$$

Der Index k bezeichnet dabei alle Nachfolgerzellen von j. t_j wird als *Teaching Input* bezeichnet und ist die Ergebnisvorgabe der Trainingsdaten.

Das bedeutet, dass für ein beliebiges Eingabemuster zunächst die Ausgabe mit den aktuellen Gewichten berechnet wird. Das Ergebnis wird dann mit der Ergebnisvorgabe t_j verglichen und daraus das Fehlersignal berechnet. Hieraus bestimmt sich dann die Gewichtsänderung der Verbindungen zu den Vorgängerneuronen. Diese Änderung wird dann entgegen der herkömmlichen Richtung der Informationsverarbeitung „rückwärts“ durch das Netz bis zur Eingabeschicht weitergegeben („rückpropagiert“).

Verschiedene Modifikationen des Backpropagation begegnen den Problemen von lokalen Minima oder Plateaus der Fehlerfunktion. Je nach Wahl der Trainingsparameter kann Backpropagation in einem lokalen Minimum hängenbleiben und so das globale Minimum nicht gefunden werden. Bei flachen Plateaus braucht das Verfahren unter Umständen sehr lange, um ein Minimum zu finden, da durch den geringen Gradienten auf einem Plateau die Gewichtsänderungen sehr klein werden. Solche und ähnliche Schwierigkeiten werden mit Verfahren wie zum Beispiel dem Momentum-Term (auch M-Prop), dem Resilient Propagation (R-Prop) oder Quickprop vermieden. Details und genauere Beschreibungen werden u.a. von ZELL (1994) geliefert.

Mit fortschreitendem Training wird der Fehler der Ausgabe der Trainingsdaten immer weiter minimiert und geht gegen Null. Dies bedeutet aber nicht immer eine Verbesserung der Leistungsfähigkeit eines Netzes. Bei zu starker Anpassung an die Trainingsdaten kann die Generalisierungsleistung des Netzwerkes

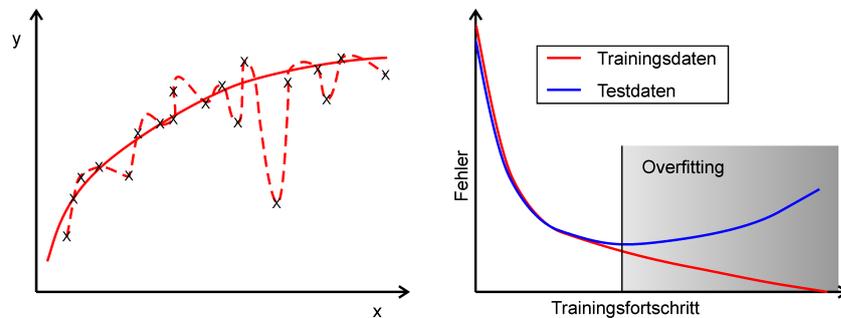


Abbildung 2.7: Problem und Vermeidung des Overfittings. Links: Modellierung bivariater Daten. Gestrichelte Linie: Überanpassung, durchgezogene Linie: größerer Fehler der Trainingsdaten, aber bessere Generalisierung. Rechts: Entwicklung der Fehler von Trainings- und Testdaten mit Fortschritt des Trainings.

verloren gehen. Das heißt, dass für neue Trainingsmuster, die dem trainierten Netz präsentiert werden, keine realistische Prognose geleistet werden kann. Für das Beispiel einer bivariaten Datenmenge ist dieses Problem in Abb. 2.7 (links) dargestellt. Dieses Phänomen wird als *Overfitting* oder *Übertrainieren* bezeichnet. Je stärker das Rauschen der Trainingsdaten, um so größer ist die Gefahr des Übertrainierens (MAIER & DANDY, 1998). Außerdem neigen neuronale Netze stärker zur Überanpassung, je mehr Verbindungen und Neuronen enthalten sind. Mit der Netzwerkgröße steigt im Allgemeinen die Fähigkeit zur Anpassung komplexerer Lösungen, damit aber auch die Tendenz zum Overfitting.

Um dieses Problem zu vermeiden, geht man in der Regel so vor, dass ein zweiter Datensatz (*Testdatensatz*) parallel zum Training berechnet und der Fehler der Ausgabe bestimmt wird. Der Fehler wird aber nicht zur Anpassung der Gewichte herangezogen. Wenn es dann zum Overfitting kommt, äußert sich dies in einem Ansteigen des Fehlers der Testdaten, während der Fehler der Trainingsdaten weiter fällt (Abb. 2.7 rechts). Das Training sollte dann beim Minimum des Fehlers der Testdaten abgebrochen werden (BISHOP, 2000). Zur optimalen Validierung des trainierten neuronalen Netzes sollte möglichst ein dritter Teildatensatz (*Validierungsdaten*) zurückgehalten werden. Dieser wird weder zur Anpassung der Verbindungsgewichte noch zur Festlegung des Trainingsendes verwendet und bietet dadurch die Möglichkeit einer unabhängigen

2 Theoretische Grundlagen

Überprüfung der Netz-Performance. Bei der Aufteilung der Datensätze sollte sichergestellt werden, dass alle Teildatensätze statistisch die gleiche Grundgesamtheit repräsentieren. Neben der rein zufälligen Aufteilung gibt es verschiedene Möglichkeiten, die Partitionierung durch statistische Methoden (Cluster-Analyse) oder auch bestimmte Formen von Neuronalen Netzen (*Self Organizing Maps*) zu optimieren (BOWDEN et al., 2002; SHAHIN et al., 2004).

3 Datengrundlage

Künstliche neuronale Netze können sehr komplexe Zusammenhänge modellieren, vorausgesetzt, dass die Trainingsdaten eine ausreichende Variationsbreite abbilden. Beziehungen, die aus den Trainingsdaten nicht ableitbar sind, bleiben verborgen. Daher ist eine umfangreiche Datengrundlage unentbehrlich, die als repräsentativ für das untersuchte Problem betrachtet werden kann und die eine ausreichende Variabilität beinhaltet. Für die vorliegende Arbeit bedeutet dies, dass eine Datengrundlage erforderlich ist, die alle wesentlichen Informationen über Ausbau, Wärmebedarf, Untergrundbeschaffenheit und Betriebsverhalten von Kleinanlagen zur Verfügung stellt.

3.1 Aktueller Stand der Datenerhebung in Deutschland und weltweit

Jede Bohrung einer Erdwärmesonde muss in Deutschland bei der unteren Wasserbehörde angezeigt und gegebenenfalls genehmigt werden. Bei Sonden, die tiefer als 100 m reichen, ist eine Anzeige oder Genehmigung bei der Bergbehörde notwendig. Aufgrund dieses Verfahrens liegen bei den Behörden die wesentlichen Informationen über Ausbau und Lage von Erdwärmesonden vor. Die Unterlagen sollten in der Regel Lagepläne, Bohrprofile, Verpress- und Druckprüfungsprotokolle, und Ausbauinformationen (z.B. Bohrdurchmesser, Sondenrohrdurchmesser, Hinterfüllmaterial, Frostschutz) enthalten. Eventuell gehen auch veranschlagte Entzugsleistung und Dimensionierungsansätze aus den Unterlagen hervor. Die Einzelheiten der Vorgaben regeln Leitfäden zur Erdwärmennutzung, die mittlerweile in den meisten Bundesländern erarbeitet wurden (siehe hierzu Abschnitt 3.2). Eine Rückmeldung aus dem alltäglichen Betrieb über die Effizienz der Anlagen findet jedoch nicht statt. Für diese Informationen sind gesonderte Messprogramme erforderlich, die bereitgestellte Wärmemengen und Systemtemperaturen erfassen.

Bundesweit gibt es bisher nur wenige systematische Untersuchungen zum Verhalten herkömmlicher Anlagen im Betrieb. Größere Anlagen, die für Forschungsprojekte ausgebaut wurden, wurden zum Teil umfangreich messtechnisch überwacht (z.B. HUNN, 2004). Für kleinere Anlagen liegen bisher aber keine repräsentativen Daten aus bundesweiten Messkampagnen vor.

Einzelne Anlagen wurden beispielsweise von der GERTEC GmbH in einer Studie zum Systemvergleich verschiedener Heizungssysteme erfasst (GERTEC GMBH - INGENIEURGESELLSCHAFT, 2001). Hierbei handelt es sich um kleinere Anlagen in privat genutzten Wohngebäuden. Der Energieversorger eon hat mehrere Anlagen messtechnisch erfasst, um die Effizienz der Anlagen im Betrieb bewerten zu können (SCHENK, 2004). Es wurden unterschiedliche Wärmequellentypen betrachtet. Bei den meisten Anlagen handelt es sich jedoch um größere Objekte wie Bürogebäude oder öffentliche Gebäude.

Das Umweltministerium Baden-Württemberg legte im Jahr 2005 ein Förderprogramm für Erdwärmesonden auf, in dem der Bau von etwa 1450 Anlagen gefördert wurde. Neben einem Zuschuss von 14 € pro Bohrmeter bis zu einer Maximalförderung von 3500 € wurden weitere 200 € bei Installation eines Wärmezählers gewährt. Dieses Angebot nahmen etwa 14 % der Antragsteller an, so dass ca. 200 Anlagen mit Wärmezählern ausgestattet worden sind (SAWILLION, 2006). Dies ermöglicht für die Zukunft eine erste Erfassung von Jahresarbeitszahlen, die eine statistisch auswertbare Datenmenge erhoffen lässt. Die Klimaschutz- und Energieagentur Baden-Württemberg GmbH empfiehlt daher, durch eine Befragung der beteiligten Bauherren, dieses durch die Förderung entstandene Potential in Zukunft noch auszuschöpfen (SAWILLION, 2006).

Aktuell planen verschiedene Stellen, wie zum Beispiel der Energieversorger EnBW und der BWP, bundesweit angelegte, systematische Messkampagnen, mit denen der Durchschnitt der betriebenen Anlagen hinsichtlich seiner Effizienz bewertet werden kann.

Auch in anderen Ländern Europas und der Welt gibt es bisher wenige systematische Studien zu diesem Thema. Weltweit stellt die Schweiz hinsichtlich der Datenerhebung die einzige Ausnahme dar. Im Rahmen der „Feldanalyse von Wärmepumpenanlagen FAWA 1996-2003“ wurden in der gesamten Schweiz Wärmepumpenanlagen bis 20 kW Heizleistung messtechnisch erfasst und die Daten ausgewertet (ERB et al., 2004). Über 90 der insgesamt 221 Anlagen nutzen Erdwärmesonden zur Wärmequellenerschließung. Hinsichtlich des

Umfangs und der Systematik der Erhebung wurden weltweit bisher keine vergleichbaren Studien veröffentlicht.

3.2 Umsetzung des Leitfadens Baden-Württemberg in den Jahren 2002-2004

Im Jahr 2001 wurde vom Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg (LGRB) erstmals ein Leitfaden zu Erdwärmesonden herausgegeben (LGRB, 2001b), der im Jahr 2005 in überarbeiteter Fassung neu erschien (LGRB, 2005)(nachfolgend als „Leitfaden“ bezeichnet). Er beschreibt kurz die technischen Grundlagen von Erdwärmesonden und erläutert dann den Verfahrensablauf von der Planung über die Bohranzeige bis zur Bauausführung und Inbetriebnahme der Anlagen. Der Leitfaden soll zu einem landesweit einheitlichen Vorgehen bei der Beurteilung und Umsetzung von geplanten Erdwärmesonden beitragen. Er gibt vor, dass bei Planung und Ausbau von Erdwärmesonden die VDI-Richtlinie 4640 „Thermische Nutzung des Untergrundes“ anzuwenden ist. Diese gibt verschiedene Möglichkeiten zur Anlagenauslegung vor und beschreibt den Stand der Technik für Ausbau und Inbetriebnahme. Der Leitfaden erläutert darüber hinaus, welche Unterlagen zur Genehmigung von Bauvorhaben vorliegen müssen und in welcher Form der Ausbau zu protokollieren ist. Im September 2001 wurden zusätzlich „Ergänzende hydrogeologische Hinweise zu Erdwärmesonden“ vom Landesamt für Geologie Rohstoffe und Bergbau im Regierungspräsidium Freiburg herausgegeben (LGRB, 2001a)(nachfolgend als „Ergänzende Hydrogeologische Hinweise“ oder „ergänzende Hinweise“ bezeichnet). Darin finden sich weitere Empfehlungen zur Bohr- und Ausbautechnik.

Im Jahr 2005 wurden Daten von den unteren Verwaltungsbehörden von vier Landkreisen in Baden-Württemberg gesammelt und analysiert, ob die Maßgaben des Leitfadens von 2001 und der Ergänzenden hydrogeologischen Hinweise eingehalten werden und wo Abweichungen bestehen. Ausgewertet wurden die Jahre 2002 bis 2004.

3.2.1 Vorgehensweise

Aus der VDI-Richtlinie 4640, dem Leitfaden für Erdwärmesonden Baden-Württemberg und den Ergänzenden hydrogeologischen Hinweisen wurden einzelne Kriterien herausgearbeitet, hinsichtlich der die vorliegenden Daten zu bewerten waren (Tab. 3.1). Die VDI-Richtlinie 4640 gibt vor, dass bei Sonden bis 50 m Länge zu benachbarten Sonden ein Abstand von 5 m eingehalten werden soll. Bei Sondenlängen zwischen 50 und 100 m werden 6 m Abstand gefordert. Die Richtlinie gibt außerdem verschiedene Möglichkeiten der Ringraumverfüllung in Abhängigkeit vom umgebenden Gestein an (Tab. 3.1). Fertigprodukte, die ausschließlich für die Hinterfüllung von Erdwärmesonden produziert werden, finden weder in der VDI-Richtlinie noch im Leitfaden oder den ergänzenden Hinweisen Erwähnung. Sie wurden in dieser Studie aber als zulässig gewertet, da für die Produkte in der Regel Unbedenklichkeitsbescheinigungen vorliegen. Die geforderte Druck- und Durchflussprüfung der Erdwärmesonden konnte anhand der vorliegenden Unterlagen nicht überprüft werden, da bei vielen Anlagen darüber keine oder nur lückenhafte Protokolle vorliegen. Nach dem Leitfaden Erdwärmesonden des LGRB muss im Antrag das vorgesehene Frostschutzmittel angegeben werden. Außerdem werden zur Dokumentation der Bohrungen die Gauß-Krüger-Koordinaten sowie die Geländehöhe des Ansatzpunktes gefordert, sowie eine geologische Dokumentation des angetroffenen Bohrprofils. Zusätzlich muss ein Ausbauplan geliefert werden. In den Ergänzenden hydrogeologischen Hinweisen zu Erdwärmesonden wird eine Dokumentation des Bohrdurchmessers und des Verpressvolumens empfohlen.

Das Volumen sollte bereits während des Verpressvorgangs mit dem zu erwartenden, rechnerisch bestimmten Volumen verglichen werden, um große Verpressverluste zu erkennen und mit geeigneten Maßnahmen reagieren zu können. Des Weiteren wird gefordert, dass der zu verpressende Querschnitt mindestens 65 % des gesamten Bohrlochquerschnitts beträgt, so dass Sonden und Verpressrohre weniger als 35 % des Querschnitts einnehmen.

Von vier verschiedenen Landratsämtern wurden die dort vorliegenden Unterlagen zu insgesamt 81 Erdwärmesondenanlagen aus den Jahren 2002 bis 2004 betrachtet. Nicht alle Empfehlungen der Richtlinie und des Leitfadens sind anhand der Unterlagen der unteren Verwaltungsbehörde nachprüfbar, da nicht alle Informationen dorthin weitergereicht werden müssen und fehlende Daten nicht zwangsläufig ein Abweichen vom Leitfaden bedeuten müssen. Es ist zu

3.2 Umsetzung des Leitfadens Baden-Württemberg

Tabelle 3.1: Kriterien zur Bewertung der Dokumentationen von Erdwärmesondenanlagen.

Forderung	Regelwerk
Geologische Dokumentation der Schichtenfolge	Leitfaden BW ¹
Gauß-Krüger-Koordinaten der Bohransatzpunkte	Leitfaden BW ¹
Geländehöhe der Bohransatzpunkte	Leitfaden BW ¹
Ausbauplan	Leitfaden BW ¹
Angabe des Frostschutzmittels	Leitfaden BW ¹
Sondenabstände: Bei Sondenlängen von 40 m bis 50 m: 5 m bei Sondenlängen > 50 m bis 100 m: 6 m	VDI 4640 ²
Angabe des Bohrdurchmessers	Ergänzungen ³
Verpressquerschnitt > 65 % der Bohrquerschnittsfläche	Ergänzungen ³
Hinterfüllung: Bentonit/HOZ ⁴ /Wasser (25:25:50) Bentonit/HOZ ⁴ /Sand/Wasser (10:10:30:50) Feinkies oder Bohrgut, wenn die Sonde auf ganzer Länge nur oberes Grundwasserstockwerk erfasst, zur Oberfläche Tonabdichtung. In nicht standfestem Untergrund kann das natürliche Schließen des Lockergesteins genutzt werden. Vorhandene Bohrspülung, versetzt mit Dämmer/ Kalksteinmehl. Im Festgestein dauerhaft dicht und beständig.	VDI 4640 ²
Erfassung des Verpressvolumens zum Vergleich mit theoretisch erforderlichem Volumen	Ergänzungen ³

Angaben zu Mischungsverhältnissen in Gewichtsprozent

¹ Leitfaden BW: LGRB (2001b)

² VDI 4640: VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (2001)

³ Ergänzungen: LGRB (2001a)

⁴ HOZ: Hochofenzement

unterscheiden zwischen einer Bewertung der Bauausführung und der Protokollierung derselben. Einerseits kann bewertet werden, welche Daten entsprechend der Empfehlungen an die Behörden weitergereicht werden, andererseits anhand der vorliegenden Daten, ob die Ausführung den empfohlenen Vorgehensweisen entspricht. Vom Nichtvorhandensein von Informationen kann jedoch nicht auf generelle Fehler beim Ausbau geschlossen werden. Daher sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass es sich hier nicht um eine Bewertung der Qualität von Erdwärmesonden handelt, sondern lediglich um eine Analyse der Umsetzung des Leitfadens und der VDI-Richtlinie hinsichtlich bestimmter Kriterien.

3.2.2 Ergebnisse

Geologische Dokumentation, Bohransatzpunkte, Ausbaupläne

Bei allen 81 Anlagen liegt eine geologische Dokumentation in Form eines Bohrprofils und/oder eines Schichtenverzeichnisses vor. In 13 Fällen (16 %) sind diese jedoch offensichtlich fehlerhaft und nicht fachgerecht. In diesen Unterlagen finden sich entweder nicht zulässige Bezeichnungen der angetroffenen Gesteine oder falsche Ansprachen. Die übrigen 68 Dokumentationen sind nicht durchgehend nach DIN 4022 ausgeführt, inhaltlich aber nicht zu beanstanden¹.

Bei weniger als der Hälfte der Anlagen (33, 41 %) sind die Bohransatzpunkte mit Gauß-Krüger-Koordinaten angegeben. Die Korrektheit konnte nicht überprüft werden. Bei 15 Anlagen (19 %) lagen keine Koordinaten vor. Bei den übrigen 33 Anlagen waren die Angaben unvollständig (z.B. ein Koordinatenpunkt für eine Anlage mit mehreren Sonden)(Abb. 3.1). In vielen Fällen ist die Lokalisierung der Bohransatzpunkte jedoch durch Flurstücksnummern und Lagepläne möglich. Die Bohransatzhöhe ist bei etwa einem Fünftel der Anlagen nicht angegeben.

Bei 71 der 81 betrachteten Anlagen liegen zufriedenstellende Ausbaupläne vor. Bei fünf sind die Pläne unzureichend und bei ebenfalls fünf fehlen Ausbaupläne vollständig (Abb. 3.2).

¹ Die DIN 4022 wurde mittlerweile zurückgezogen und wird ersetzt durch die internationalen Normen DIN EN ISO 14688-1, DIN EN ISO 14688-2, DIN EN ISO 14689-1, DIN EN ISO 22475-1. Für den betrachteten Zeitraum wird die DIN 4022 jedoch als Standard angenommen.

3.2 Umsetzung des Leitfadens Baden-Württemberg

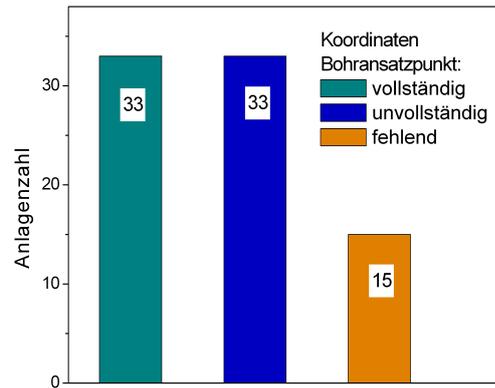


Abbildung 3.1: Vollständigkeit der Angaben von Gauß-Krüger-Koordinaten der Bohransatzpunkte.

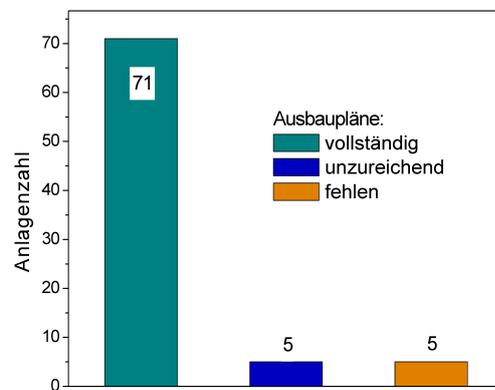


Abbildung 3.2: Vorliegen und Vollständigkeit von Ausbauplänen.

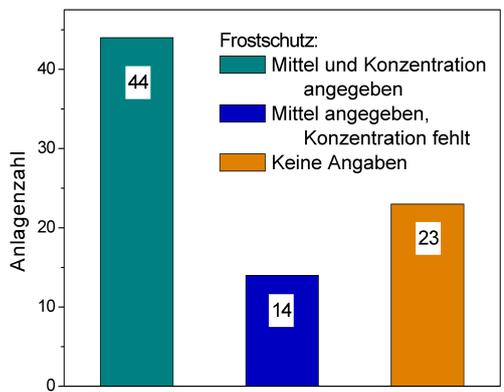


Abbildung 3.3: Vollständigkeit der Angaben über verwendete Frostschutzmittel und deren Konzentration.

Frostschutzmittel

Bei 28 % (23) der Erdwärmesonden ist aufgrund der vorhandenen Unterlagen nicht erkennbar, ob ein Frostschutzmittel eingesetzt bzw. welches Mittel verwendet werden soll. Bei gut der Hälfte der Anlagen (44) ist außer der Art des Frostschutzes auch die Konzentration dokumentiert (Abb. 3.3).

Sondenabstände

11 der geprüften Dokumentationen beschreiben Anlagen mit nur einer Erdwärmesonde, so dass das Kriterium der Sondenabstände entfällt. Bei fast 50 % (34) der verbleibenden 70 Anlagen können die Abstände zwischen den Sonden aus den vorliegenden Informationen abgeleitet werden. 12 weisen zu geringe Abstände auf, die übrigen 22 entsprechen den Empfehlungen der VDI-Richtlinie. Bei den übrigen 36 Anlagen ist die Position der Sonden zueinander nicht ausreichend durch Lagepläne oder Koordinaten protokolliert (Abb. 3.4).

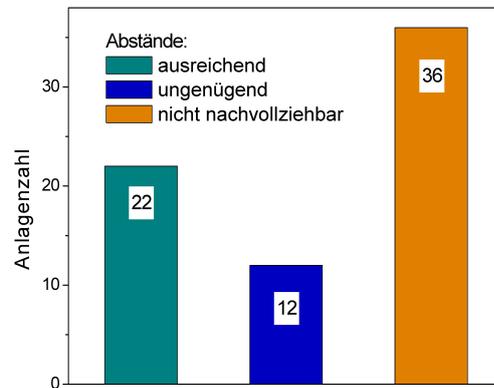


Abbildung 3.4: Dokumentation der Sondenabstände bei Anlagen mit mehreren Erdwärmesonden.

Bohrdurchmesser (Enddurchmesser) und Verpressquerschnitt

Bei fast allen geprüften Unterlagen ist der Bohrdurchmesser der Erdwärmesondenbohrung angegeben. Er beträgt zwischen 110 mm und 200 mm, bei mehr als der Hälfte um 150 mm (150 mm und 152 mm) (Abb. 3.5). Nur in einem Fall wird über den Bohrdurchmesser keine Aussage getroffen. Zur Bewertung des Verpressquerschnitts ist darüber hinaus die Kenntnis der Sondenrohrdurchmesser notwendig. Üblicherweise werden Sondenrohre mit einem Außendurchmesser von 32 mm verwendet. Einzelne Sonden (4) weichen davon ab und wurden mit 25 mm ausgebaut (Abb. 3.6). Diese geringen Durchmesser werden in der Regel nur für Sonden geringerer Tiefe (≤ 90 m) verwendet (Abb. 3.7). Bei vier Anlagen sind keine Sondenrohrdurchmesser angegeben. Es liegen keine Informationen über Anzahl und Durchmesser der verwendeten Verpressrohre vor. Nimmt man an, dass durch einen Verpressschlauch mit 25 mm Durchmesser verfüllt wurde, so ist bei 6 von 77 Anlagen (8 %) der Verpressquerschnitt kleiner als 65 % des Gesamtquerschnitts und damit kleiner als in den Ergänzenden hydrogeologischen Hinweisen empfohlen (Abb. 3.8). Bei diesen Sonden wurde ein Bohrlochdurchmesser von 115 mm gebohrt und 32 mm dicke Sondenrohre verwendet. Sehr großzügige Verpressquerschnitte (> 85 %) sind in den meisten Fällen auf die Verwendung von 25 mm Sondenrohren in 150 mm Bohrungen zurückzuführen.

3 Datengrundlage

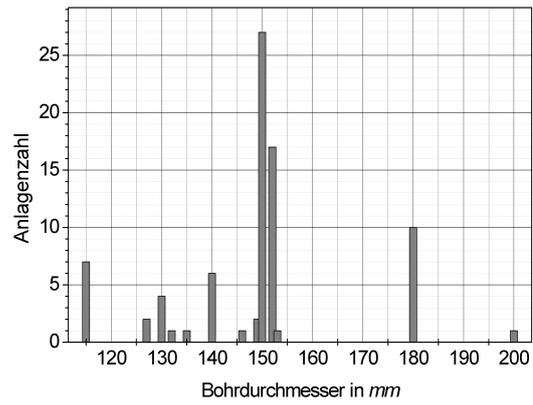


Abbildung 3.5: Dokumentierte Bohrl Lochdurchmesser.

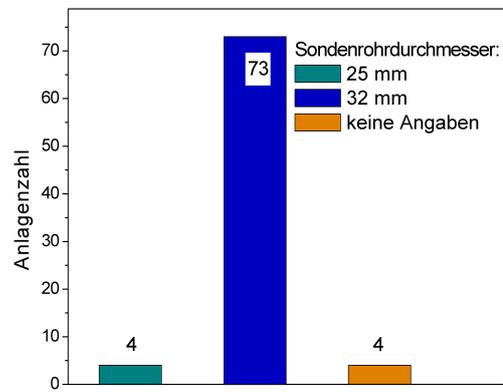


Abbildung 3.6: Dokumentierte Sondenrohrdurchmesser.

3.2 Umsetzung des Leitfadens Baden-Württemberg

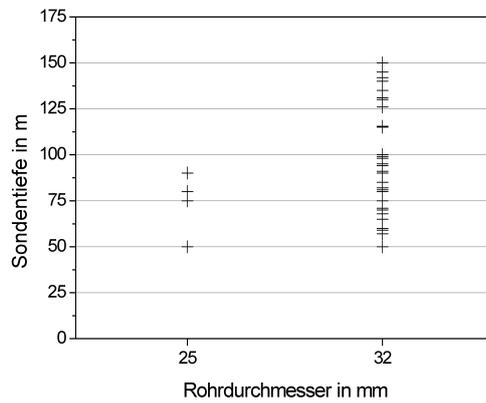


Abbildung 3.7: Zusammenhang zwischen Rohrdurchmesser und Sondentiefe. Für tiefere Sonden werden ausschließlich größere Durchmesser (32 mm) verwendet.

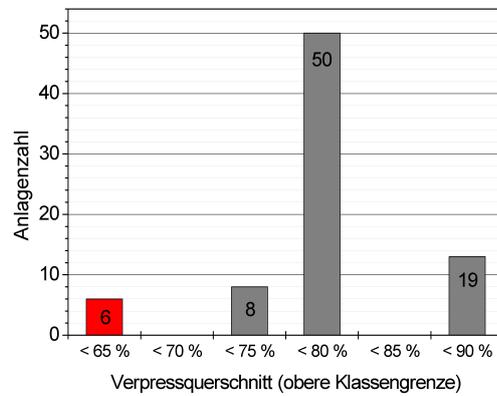


Abbildung 3.8: Histogramm der Verpressquerschnitte in Prozent des Gesamtquerschnitts unter der Annahme, dass ein Verpressrohr mit 25 mm Durchmesser eingesetzt wurde.

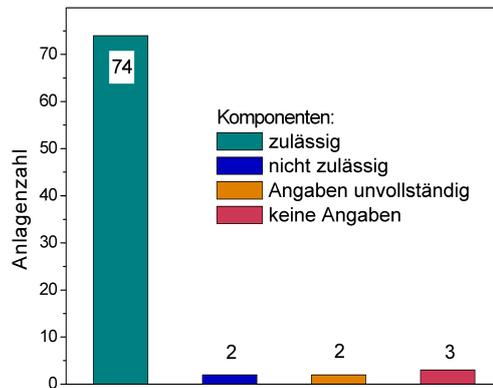


Abbildung 3.9: Dokumentation der Komponenten der zur Hinterfüllung verwendeten Materialmischungen.

Ringraumverfüllung

Bei 91 % der Anlagen (74) sind die angegebenen Komponenten zulässig, zwei Anlagen entsprechen hinsichtlich der verwendeten Materialien offensichtlich nicht den Empfehlungen. Bei diesen wurden durchlässige Materialien (Sand, Kies) verwendet. Im einen Fall erfasste die Sonde mehrere Grundwasserstockwerke, im zweiten wurden die oberen vier Meter durchlässig verfüllt, so dass Oberflächenwasser in den oberen Kiesgrundwasserleiter gelangen kann. Bei drei Anlagen sind gar keine Materialien angegeben, in den übrigen zwei Fällen sind die Angaben nicht eindeutig (Abb. 3.9).

Nur bei 21 der 81 Anlagen (26 %) ist die Zusammensetzung der Verfüllung mit eindeutig nachvollziehbaren Inhaltstoffen und Mengenverhältnissen protokolliert. In den übrigen Fällen sind die Inhaltstoffe nicht eindeutig benannt und/oder die Mengenverhältnisse unklar. Bei 11 der genauer dokumentierten Fälle entspricht die Rezeptur der verwendeten Suspensionen jedoch nicht den Vorgaben der VDI-Richtlinie. Bei nur 10 Anlagen ist die Verfüllung als korrekt nachvollziehbar (Abb. 3.10).

In Dreiviertel der Fälle (60) sind die verpressten Volumina plausibel protokolliert, bei 8 scheinen die Angaben fehlerhaft. 13 Anlagen sind ohne Angaben über Verpressmengen.

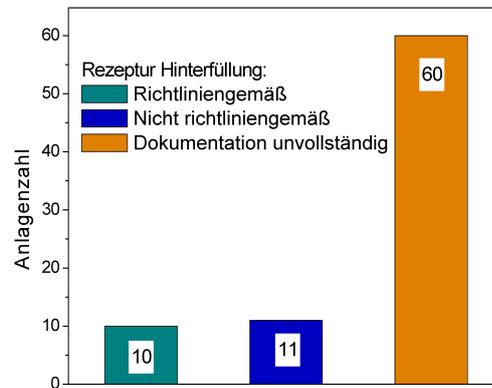


Abbildung 3.10: Dokumentation der Rezepturen mit Inhaltsstoffen und Mengenverhältnissen für die Hinterfüllung.

3.2.3 Bewertung

In den gesammelten Unterlagen zu ausgeführten Erdwärmesondenanlagen sind große Qualitätsunterschiede in der Dokumentation des Ausbaus festzustellen. Die wenigsten Protokolle sind als einwandfrei zu bezeichnen. Zum Teil sind die Unterlagen aber durchaus ordentlich geführt, auch wenn kleinere Abweichungen von der vorgeschriebenen Dokumentation bestehen. So können zum Beispiel die Koordinaten von Bohransatzpunkten ohne Informationsverlust durch gewissenhaft erstellte Lagepläne ersetzt werden. Ein Großteil der Unterlagen belegt aber wesentliche Mängel in der Dokumentation und auch der Bauausführung.

Hinsichtlich einzelner Kriterien werden die bestehenden Vorgaben und Empfehlungen nicht ausreichend eingehalten. Bei einem Teil der Anlagen geben unzulängliche Dokumentation und Abweichungen von den Vorgaben der VDI-Richtlinie und des Leitfadens Anlass zu Zweifeln an der fachgerechten Bauausführung der Erdwärmesonden. Einzelne Dokumentationen der angetroffenen Schichtenfolgen weisen auf mangelnde Fachkompetenz hin. Zahlreiche Unterlagen sind ordentlich geführt, weichen aber trotz allem von den Vorgaben ab.

Die gewissenhafte Dokumentation der Frostschutzmittel und ihrer Konzentration kann im Leckage-Fall eine schnelle Einschätzung des Schadens erheblich

erleichtern. Bisher sind diese Angaben leider sehr lückenhaft.

Die Bewertung der Sondenabstände ist abhängig von der Qualität der Lagedaten. Wie verlässlich diese sind, ist anhand der Unterlagen nicht feststellbar. Geht man von korrekten Lagedaten aus, so sind die Sondenabstände in gut einem Drittel der Fälle geringer als empfohlen. Dies kann die Leistung der Anlage auf längere Sicht durch Überlagerung der Einflussbereiche der Erdwärmesonden verringern (KOENIGSDORFF & SEDLAK, 2006).

Besonders bei der Hinterfüllung des Ringraums sind erhebliche Unterschiede zu erkennen. Hier besteht das Problem, dass die VDI-Richtlinie zwar genaue Vorgaben macht, diese jedoch relativ vielfältig und unter Umständen unübersichtlich sind. Die Verwendung von Bohrgut oder Kies ist erlaubt, jedoch mit verschiedenen Einschränkungen. Das Bohrgut muss ausreichend feinkörnig sein und darf nur dann verwendet werden, wenn sich die Sonde über die gesamte Länge ausschließlich im obersten Grundwasserleiter befindet. Zur Oberfläche hin muss eine Tonabdichtung eingebracht werden (VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE, 2001).

Bei der Verwendung von Zement-Bentonit-Suspensionen oder Zement-Bentonit-Sand-Suspensionen sind die Wassergehalte häufig nicht protokolliert. Diese können aber Auswirkungen auf die Festigkeit und Durchlässigkeit der Hinterfüllung haben (RÜSGEN, 2003; HERRMANN, 2003).

Der Zementgehalt kann das Ausmaß der Grundwasserbeeinflussung stark verändern. Bei sehr hohen Zementgehalten, wie sie zum Teil verwendet werden (> 60 %), ist eine vorübergehende, starke Veränderung der chemischen Parameter im Grundwasser zu erwarten.

Die Bohrlochdurchmesser sind offensichtlich größtenteils entsprechend der Empfehlungen ausgeführt. Die Ergebnisse des Verpressquerschnitts basieren aber auf der Annahme eines Verpressrohres mit 25 mm Durchmesser. Werden andere Durchmesser oder mehrere Verpressrohre verwendet, ändern sich die Verhältnisse.

3.3 Die Schweizer FAWA-Studie

Im Auftrag des Bundesamts für Energie der Schweiz (BfE) wurde von ERB et al. (2004) zwischen 1996 und 2003 eine Studie durchgeführt, in der neue oder bestehende Wärmepumpenanlagen mit verschiedenen Messgeräten aus-

gestattet und über längere Zeit Daten erhoben wurden. Ziel der Studie war einerseits eine Bestandsaufnahme der privat betriebenen Kleinanlagen in der Schweiz, andererseits Optimierungspotentiale aufzudecken.

Es wurden Anlagen bis 20 kW thermischer Leistung in das Messprogramm aufgenommen, sowohl aus Neubauten, als auch aus dem Bestand und Sanierungsobjekte. Etwa 45 % der insgesamt 221 betrachteten Anlagen werden mit Sole/Wasser-Maschinen betrieben, die überwiegende Zahl davon mit Erdwärmesonden. Für die vorliegende Arbeit wurden von 66 Anlagen Messdaten und Bohrprofile der Erdwärmesonden vom BfE zur Verfügung gestellt.

Jede Anlage wird durch ihre Stammdaten charakterisiert, die folgende Informationen enthalten:

- Baujahr des Gebäudes
- geografische Höhe
- Leistungsbedarf des Objekts laut Auslegung
- Vorlauftemperatur laut Auslegung
- Anzahl der Personen
- Vorliegen der WPZ-Prüfung für die Wärmepumpe
- Leistungscharakteristik (ein- oder zweistufig)
- Art des Kompressors
- Heizleistung der Wärmepumpe
- Art des Abgabesystems
- Art der Warmwasserbereitung.

Außerdem ist das Hydraulikschema der Anlage gegeben. Zusätzlich zu dieser Charakterisierung liegt pro Anlage ein MS-Excel-File, bestehend aus drei Tabellenblättern, mit weiteren Informationen und Messdaten vor. Im Tabellenblatt *Erdwärmesonden* sind die Planungswerte und protokollierten Daten zu den Erdwärmesonden gegeben (Abb 3.11):

3 Datengrundlage

- Sondentiefe, -anzahl und Rohrdurchmesser
- Entzugsleistung laut Auslegung
- Frostschutzmittel (mit Konzentration)
- Sondentyp
- Verpressmaterial
- Bohrverfahren
- Grundwasser
- Angetroffene Bodentypen

Die angetroffenen Grundwassermengen sind nur qualitativ bewertet (Kategorien: ja/nein oder kein/wenig/mittel/viel). In den Bohrprofilen werden 13 verschiedene Bodentypen unterschieden, wobei damit sowohl Locker- als auch Festgesteine erfasst werden (Abb. 3.11). Es handelt sich dabei um eine eher grobe lithologische Einteilung, die die in der Praxis üblichen Klassifikationen umfasst. Die gesamte Vielfalt der in der Schweiz vorkommenden gebirgsbildenden Gesteine mit ihren unterschiedliche lithologischen Ausprägungen kann durch diese Einteilung nicht wiedergegeben werden. Das Spektrum umfasst jedoch die wesentlichen Gesteinsarten, deren Unterscheidung in der praktischen Anwendung üblich und problemlos möglich ist. In einer Tabelle werden die angetroffenen Gesteine mit ihrer kumulativen Mächtigkeit aufgeführt. Informationen über Wechsellagerungen oder die Tiefenlage von Schichtgrenzen liegen nicht vor.

Die Tabellenblätter *log* und *Anlagendaten* enthalten Messwerte und Berechnungsgrößen. Die wichtigsten Messgeräte waren Temperaturfühler zur Erfassung verschiedener Systemtemperaturen, Stromzähler und Wärmezähler zu Bestimmung der bereitgestellten Wärmemengen. Die Datenaufzeichnung erfolgte in Langzeitmessungen über mehrere Jahre und detaillierteren Kurzzeitmessungen über mehrere Wochen bis Monate. Über lange Zeit wurden in Intervallen von i.d.R. einer Woche vom Hausherrn der Stromverbrauch, die Wärmemenge und die Laufzeit der Wärmepumpe sowie die Anzahl der Starts dokumentiert. Aus diesen regelmäßigen Zählerablesungen wurden verschiedene Kennwerte ermittelt:

3.3 Die Schweizer FAWA-Studie

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Erdwärmesonde	1071							
2	EWS-Planungsdaten				Bohrprotokoll EWS				
3	Anzahl Sonden	2 Stk.			Anzahl Sonden		2	Stk.	
4	Sondentiefe	110 m			Sondentiefe		110	m	
5	Sondendurchmesser	32 mm			Sondendurchmesser		32	mm	
6	Ertragsleistung	9.1 kW			Sondentyp		DoppelU		
7	Jahresenergieertrag	kWh			Verpressung		Zement/Bentonit 70/30%		
8					Bohrfirma				
9					Bohrmethode		Spühl-Hammerbohrung		
10	Glykol				Bohrprofil				
11	Art.	Aethylenglykol			Bodentyp		Obere Süßwassermolasse		
12	Konzentration, Planung	25.0 %			Spezielles				
13	Konzentration, Real	%			Grundwasser				
14					Kavitäten				
15					Spülverluste				
16					Erdgas				
17									
18					Bodentyp (EWS und Erdregister)		WLF [W/mK]		
19					Trocken und locker		1.00	m	
20					Festgest. o. wasserf. Lockergest.		2.25		
21					Festgestein mit hoher WLF		4.00		
22					Kies / Sand: trocken		0.40	11.0	12
23					Kies / Sand: Wasser		1.80		
24					Ton / Lehm: feucht		1.60		
25					Kalkstein		2.80		
26					Sandstein		2.30		
27					Granit		3.40		
28					Basalt		1.70		
29					Gneis		2.70		
30					Mergel		2.30	89.0	98
31					Nagefluh		2.80		
32					Total		100.0	100.0	110
33									
34									

Abbildung 3.11: Ansicht des Tabellenblatts *Erdwärmesonden* (hier Anlage 1071).

3 Datengrundlage

- Normierte Jahresarbeitszahl
- Wärmemenge ab Wärmepumpe (jeweils über die Messjahre und Mittelwert)
- protokollierte Störungen der Anlage
- Auslastungsgrad über Außentemperatur (und Mittelwert)
- Häufigkeit der Laufzeit pro Start (und Mittelwert)

Diese sind im Tabellenblatt *Anlagendaten* dokumentiert. Für die Kurzzeitmessungen (Tabelleblatt *log*) wurden Datenlogger installiert, die in Intervallen von 5 bis 30 Minuten über Zeiträume von 2 Wochen bis 7 Monate folgende Größen aufzeichneten:

- Datum
- Uhrzeit
- Heizungsvorlauftemperatur
- Quelltemperatur (nach Untergrundpassage, vor Eintritt in die Wärmepumpe)
- Außentemperatur
- Kompressorlaufzeit
- Anzahl Starts

Weitere Details zu Anlagenauswahl, Datenerhebung, Auswertung und Ergebnissen der FAWA-Studie sind ERB et al. (2004) und ROGNON (2004) zu entnehmen.

3.4 Vergleich von deutschen und schweizer Anlagendaten

Da in der Schweiz die Wärmepumpentechnik bereits seit vielen Jahren etabliert und weit verbreitet ist, nimmt sie in Fragen von Qualitätsstandards häufig eine Vorreiterrolle ein. Viele Richtlinien in Deutschland und auch in anderen europäischen Ländern orientieren sich am Stand der Technik und den

3.4 Vergleich von deutschen und schweizer Anlagendaten

Erfahrungen der Schweiz. Die praktische Umsetzung ähnelt sich daher in der Schweiz und in Deutschland. Im Folgenden werden die vorliegenden Daten aus Baden-Württemberg im Detail dem Datensatz aus der Schweiz gegenübergestellt. Dabei werden folgende Merkmale berücksichtigt: Anlagengröße, Sondenanzahl, Sondentiefe, Gesamtsondenlängen, Sondenrohrdurchmesser, Hinterfüllung, Frostschutz und geografische Höhenlage.

3.4.1 Anlagengröße

In der FAWA-Studie wurden ausschließlich privat betriebene Kleinanlagen erhoben, deren thermische Leistung $< 20 \text{ kW}$ ist. Bei der Datensammlung in den vier Landkreisen Baden-Württembergs wurden auch größere Objekte erfasst, so ein Kindergarten, eine Sportstätte und ein größeres Firmengebäude. Diese Anlagen unterscheiden sich in ihrem Heizleistungsbedarf und damit in der gesamten Charakteristik von den übrigen Kleinanlagen. Von den Landratsämtern liegen in den meisten Fällen keine exakten Angaben über Heizleistung oder Wärmebedarf vor. Aufgrund der Anlagengrößen hinsichtlich der Gesamtanzahl der Sondenmeter kann aber davon ausgegangen werden, dass es sich überwiegend ebenfalls um privat betriebene Kleinanlagen handelt, die mit denen der FAWA-Studie vergleichbar sind. Die drei deutschen Großanlagen werden bei den weiteren Vergleichen ausgeschlossen.

3.4.2 Sondenanzahl

Die meisten schweizer Anlagen sind mit nur einer Sonde ausgebaut, während in den deutschen Daten die Anlagen mit zwei Sonden überwiegen. Die Verteilung ist in Abb. 3.12 dargestellt. In der Schweiz ist im Vergleich eine Tendenz zu geringeren Sondenanzahlen zu erkennen.

3.4.3 Sondentiefe

In der Schweiz streuen die vorkommenden Sondentiefen über einen breiten Bereich. Die flachsten Sonden erreichen eine Endteufe von 45 m, die tiefsten 250 m. Der Mittelwert liegt bei 133 m. Die in Baden-Württemberg erfassten Sondentiefen liegen zwischen 33 und 150 m mit einem Mittelwert von 95 m. In beiden Ländern weisen die Verteilungen ein Minimum direkt oberhalb von

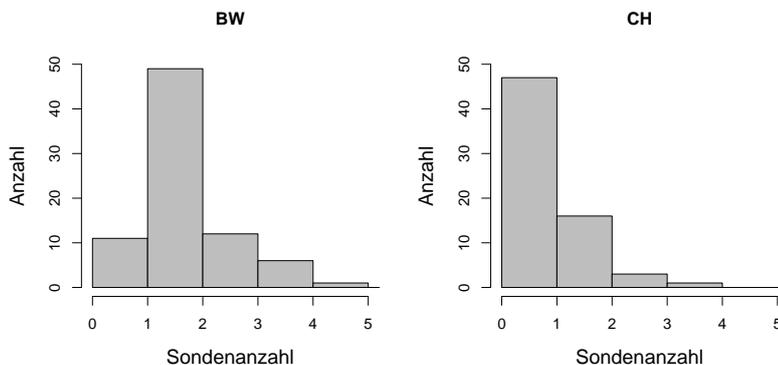


Abbildung 3.12: Histogramme der Sondenanzahl.

100 m auf (Abb. 3.13). In Deutschland erklärt sich dieser Einbruch durch das etwas andere Genehmigungsverfahren, das bei Sonden tiefer 100 m zusätzlich über die Bergbehörde abzuwickeln ist. Dadurch werden Sondentiefen oft auf 100 m begrenzt und nur in wenigen Fällen auch größere Bohrtiefen genutzt.

3.4.4 Gesamtsondenlängen

Aus der Multiplikation von Sondentiefe und -anzahl ergibt sich die Gesamtsondenlänge. Wegen des Trends zu größeren Sondentiefen und gleichzeitig zu weniger Sonden in der Schweiz ist die Bandbreite der Gesamtsondenlängen in beiden Datensätzen sehr ähnlich (Abb. 3.14). In Deutschland liegen die Werte zwischen 57 und 396 m (Mittelwert 193 m), in der Schweiz zwischen 82 und 400 m (Mittelwert 163 m). Die überwiegende Zahl von Anlagen arbeitet mit < 200 Sondenmeter.

3.4.5 Sondenrohrdurchmesser

Entsprechend der Verteilung der Sondentiefen werden bei Sondenrohren in der Schweiz verstärkt größere Durchmesser eingesetzt. In Deutschland kommen 25 mm und 32 mm zum Einsatz, in der Schweiz 32 mm und 40 mm (s. Abb. 3.7 und 5.3)

3.4 Vergleich von deutschen und schweizer Anlagendaten

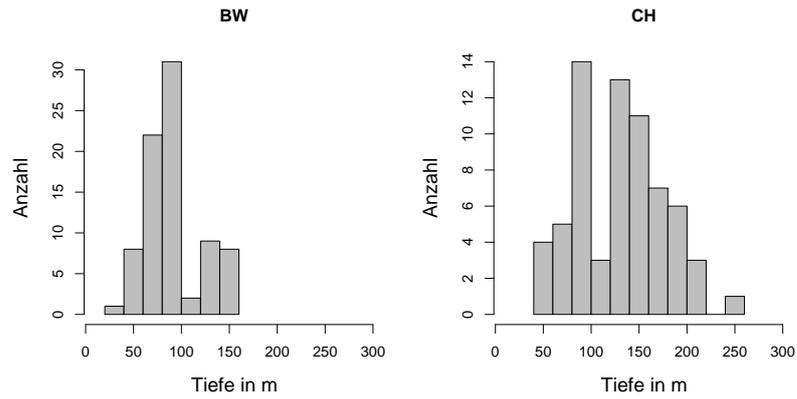


Abbildung 3.13: Histogramme der Sondentiefen.

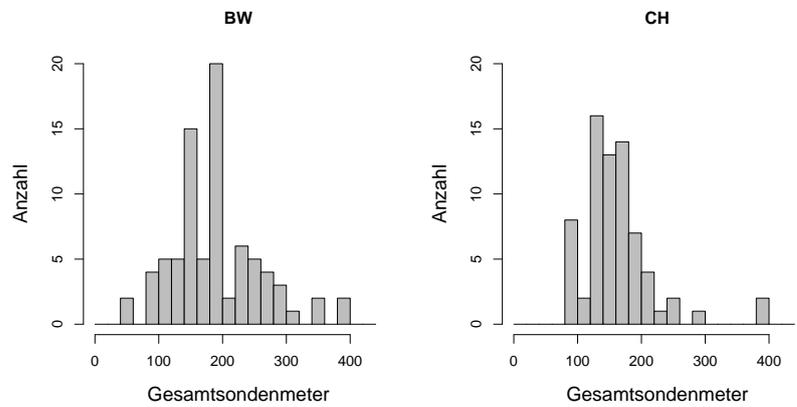


Abbildung 3.14: Histogramme der Gesamtsondenlängen.

3.4.6 Hinterfüllung

In der Schweiz wird ausschließlich mit Zement-Bentonit-Suspensionen verpresst, wobei sich die Trockenmasse aus 70 % Zement und 30 % Bentonit zusammensetzt. Über den Wassergehalt der Suspensionen liegen keine Informationen vor. In Deutschland werden häufiger auch thermisch verbesserte Materialien eingesetzt, entweder in Form von Fertigprodukten oder durch Sandbeimengungen zu der Zement-Bentonit-Mischung. In Einzelfällen werden Teilstrecken auch mit Filterkies hinterfüllt. Außerdem kommen thermisch nicht verbesserte Fertigprodukte (Dämmen, Füllbinder) zum Einsatz. Der Großteil der Sonden wird aber auch in Deutschland mit Zement-Bentonit-Suspensionen verfüllt (Abb. 3.15).

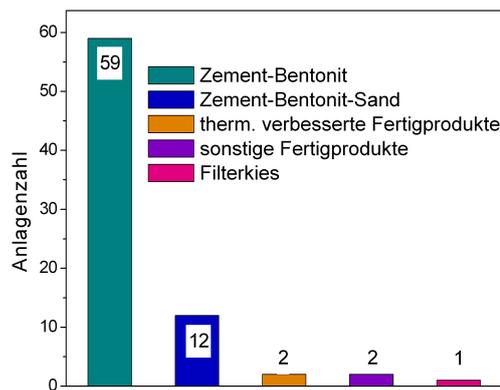


Abbildung 3.15: Verwendete Hinterfüllungen im deutschen Datensatz.

3.4.7 Frostschutz

Grundsätzlich werden die meisten Erdwärmesondenanlagen mit einem Frostschutzmittel im Solekreislauf betrieben. Dafür werden stets Alkohol-Wassergemische verwendet, die Alkohol-Konzentrationen variieren. In Deutschland wird bei vielen Anlagen ein Frostschutzmittelgehalt von < 3 % angegeben (Abb. 3.16). Die Verteilung hat ein zweites Maximum zwischen 20 % und 30 %. Der Großteil der schweizer Anlagen wird mit 20 bis 25 %

3.4 Vergleich von deutschen und schweizer Anlagendaten

Frostschutzmittel betrieben, das Maximum beträgt 33 %. Bei den ausgewerteten Anlagen aus Deutschland ist der Mittelwert der Frostschutzkonzentration mit 16 % niedriger als in der Schweiz (23 %).

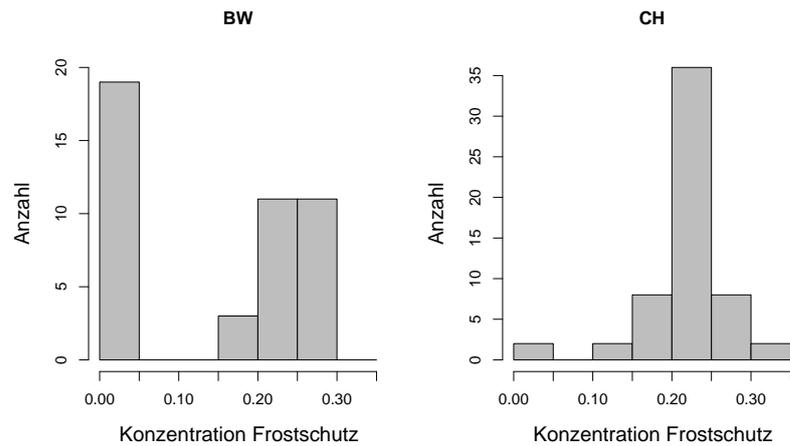


Abbildung 3.16: Histogramme der Frostschutzmittel-Konzentrationen.

3.4.8 Geografische Höhenlage

Entsprechend dem Relief der Gebiete aus denen die Daten gesammelt wurden streuen die FAWA-Daten über einen weiteren Bereich und weisen im Mittel größere geografische Höhen auf, als die Daten der baden-württembergischen Umweltämter. In Baden-Württemberg variiert die dokumentierte Höhe zwischen 130 und 671 m ü NN (Mittelwert 402 m ü NN), in der Schweiz zwischen 317 und 1598 m ü NN (Mittelwert 603 m). Aus dem Histogramm in Abb. 3.17 wird jedoch deutlich, dass die höchsten Werte (> 1500 m) Ausreißer sind. Der überwiegende Teil der Anlagen liegt in Höhenlagen < 1000 m.

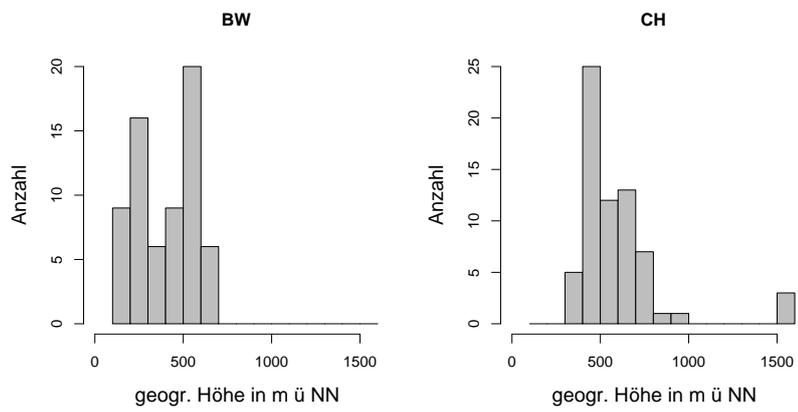


Abbildung 3.17: Histogramme der geografischen Höhenlage.

4 Geologischer Überblick

Da die in dieser Arbeit beschriebene Modellentwicklung anhand von Daten aus der Schweiz geschieht, werden im Folgenden kurz die geologischen Verhältnisse der Schweiz als Überblick dargestellt. Als Vergleichsgebiet hinsichtlich Datengrundlagen und Modellübertragbarkeit dient das westliche Baden-Württemberg mit den Regionen Oberrheingraben und Schwarzwald. Da für die oberflächennahe geothermische Nutzung in erster Linie die Lithologie von Bedeutung ist, liegt das Hauptaugenmerk auf den stratigraphischen und lithologischen Beschreibungen. Die strukturgeologischen Merkmale (z.B. Lagerungsverhältnisse, Verfaltung) dürfen für diese Anwendung in den Hintergrund treten.

4.1 Die Schweiz

4.1.1 Übersicht

Die Schweiz wird geologisch in drei Großeinheiten unterteilt: Das Juragebirge im Westen und Nordwesten, das im Südosten daran anschließenden Mittelland und die Alpen, die den Südosten des Landes einnehmen. In Abb. 4.1 zeigt eine Übersichtskarte die Verbreitungen der drei auch landschaftlich sehr unterschiedlichen Gebiete.

Die gesamte Schweiz ist maßgeblich geprägt durch die Bildung, Heraushebung und Erosion der Alpen. Das Juragebirge erfuhr seine Faltung in den jüngsten Deformationsphasen der alpidischen Gebirgsbildung. Das Mittelland stellt den Schweizer Teil des alpinen Molassebeckens dar, in dem sich mächtige Abtragungsprodukte der Alpen gesammelt haben.

Der folgende Abriss stützt sich im Wesentlichen auf die Darstellungen von LABHART (1992), SCHÖNENBERG & NEUGEBAUER (1997) und WALTER (1995). Eine geologische Übersichtskarte ist im Anhang B in Abb. B.1 dargestellt.

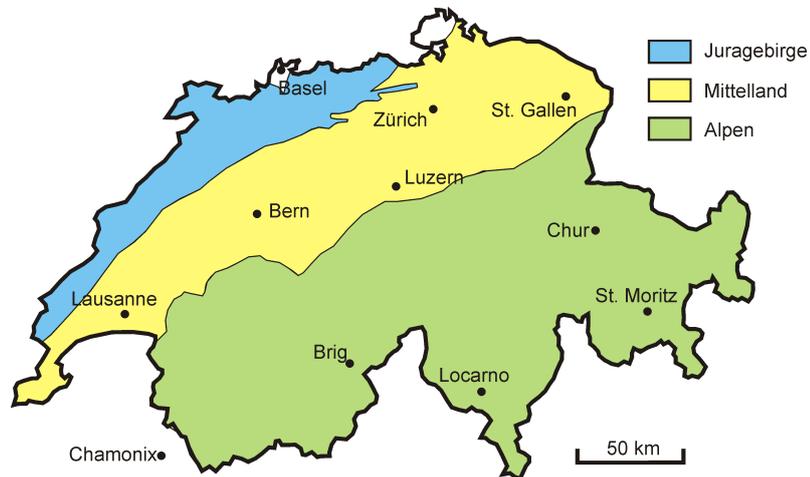


Abbildung 4.1: Übersichtskarte der Schweiz mit Abgrenzung von Juragebirge, Mittelland und Alpen (nach LABHART, 1992).

4.1.2 Juragebirge

Das Juragebirge erstreckt sich in Form eines langen Faltengürtels entlang der nördlichen und nordwestlichen Landesgrenze der Schweiz. Es findet seine westliche Fortsetzung im Französischen Jura. Die Landschaft ist geprägt durch großzügige Täler und markante Erhebungen der Faltensattel. Die größten Erhebungen liegen etwa 1600 bis 1700 m über dem Meer.

Im Juragebirge findet man eine lückenlose mesozoische Schichtenfolge, die auf den Salzgesteinen des mittleren Muschelkalks und des mittleren Keupers vom kristallinen Grundgebirge abgeschert und verfaltet wurden. Die Schichtenfolge wird dominiert von Kalken und Ton- und Mergelgesteinen. Aufgrund der größeren Verwitterungsbeständigkeit sind die Kalke, besonders die massiven Kalksteine des Oberjura (Kimmeridgien), landschaftsprägend. Der zeitliche Abschnitt des Jura in der Erdgeschichte wurde nach dem Schweizer Juragebirge benannt.

Stratigraphie des Mesozoikums und Känozoikums

Die Triassischen Gesteine des Juragebirges sind in germanischer Fazies ausgeprägt. Typisch für die germanische Fazies ist eine Dreiteilung in Buntsandstein, Muschelkalk und Keuper. Der Buntsandstein ist dabei von klastischen, häufig festländischen Sedimenten dominiert. Im Muschelkalk herrschen marine Kalke vor, wobei aber auch Dolomite, Salzgesteine und tonige Sedimente vorkommen. Die Sedimentation des Keuper ist eher tonig und mergelig geprägt.

Die untersten triassischen Einheiten (Buntsandstein) sind im Juragebirge nicht aufgeschlossen. Die Anhydrit- und Salzvorkommen des mittleren Muschelkalk sind als Abscherhorizont im Schweizer Jura von Bedeutung. Darüber folgen marine, fossilreiche Kalke des Hauptmuschelkalks. Im Keuper zeigen Kohlevorkommen (Lettenkohlenkeuper), bunte Tonsteine des Gipskeuper mit Anhydriteinlagerungen, Salze und fluviatile Sandsteine (Schilfsandstein) die zunehmende Verlandung dieser Phase an.

Die Gesteine aus der Zeit des Jura sind durch erneute Transgression stärker kalkig ausgeprägt. An der Basis finden sich noch tonige und mergelige Gesteine wie der Opalinuston, der auch aus dem Schwäbischen Jura bekannt ist. Darauf folgen Crinoidenkalke, Korallen- und Bryozoenkalke sowie die oolithischen Kalke des Hauptrogensteins. Im nordöstlichen Beckenbereich gibt es neben diesen verschiedenen Kalksteinen auch mergelig-tonigere Sedimentgesteine. Im Oberjura entstehen die massiven, dickbankigen Kalksteine des Kimmeridgien, die für das Landschaftsbild des Schweizer Jura typisch sind. An der Grenze zur Kreide zeichnet sich eine allgemeine Regression ab, so dass eher dünnbankige Kalke und Dolomite entstehen, vereinzelt auch Brackwasserkalke und -tone sowie Gips.

In der Unterkreide bedeckt das von Süden kommende Meer den mittleren und südlichen Jura, so dass dort Mergel, Kalke und glaukonithaltige Sande abgelagert werden. Der südöstliche Jura ist zu dieser Zeit festländisch. In der Oberkreide greift das Meer vom Norden her über. Aus dem Cenoman sind im westlichen Jura noch Schreibkreidevorkommen erhalten. Im Übergang zum Tertiär kommt es im gesamten Gebiet zu Hebung und Erosion, so dass die Gesteine des Tertiärs diskordant den oberen und mittleren Jura überlagern.

Im Eozän entstehen unter festländischen Bedingungen Bohnerze und Süßwassertone, die in Senken der verkarsteten Landschaft abgelagert werden. Des Weiteren finden sich Quarzsande und Süßwasserkalke. In dieser Zeit entste-

hen auch die Bruchstrukturen des Oberrheingrabens und des Bresse-Grabens. Im Oligozän beginnt im Südosten die Absenkung des Molassebeckens. Im Oberen Oligozän ist dieses mit den Becken des Oberrheingrabens und des Bresse-Grabens verbunden und es herrschen marine Ablagerungsbedingungen. Im Wechsel von festländischen und marinen Ablagerungsbedingungen entstehen im Oligozän und Miozän im Alpenvorland die typischen Molasseablagerungen mit überwiegend klastischen und tonig-mergeligen Sedimenten, die im Juragebirge aber nur vereinzelt in Mulden erhalten sind.

Abscherung und Faltung des Juragebirges

Mit der letzten großen Überschiebungsphase der Alpen wurden die Sedimentpakete des Juragebirges entlang der Evaporite des mittleren Muschelkalks und des mittleren Keupers von den unterlagernden Schichten abgeschert und in NW-SE Richtung eingeeengt. Die Faltung ist geprägt durch den vielfachen Wechsel von kompetenten Kalksteinen und inkompetenten Mergeln und Tonsteinen. Dadurch entstehen komplizierte Antiklinalen, häufig haben sich Kofferfalten gebildet und es sind disharmonische Faltungen entstanden. Durch nur geringmächtige Überdeckung erfolgte die Deformation oft bruchhaft. Die Faltenachsen sind uneinheitlich orientiert. Zwischen den Antiklinalen sind langgestreckte Mulden entstanden, die sich in der Landschaft als großzügige Täler offenbaren.

4.1.3 Mittelland

Das Schweizer Mittelland wird durch das Juragebirge im NW und die Alpen im SE begrenzt. Es handelt sich um den Teil der Schweiz, mit der höchsten Bevölkerungsdichte und den wesentlichen Zentren der Industrie. Das Mittelland stellt einen Teil des großen, den Alpen im Norden vorgelagerten Molassebeckens dar, das sich über mehr als 1000 km von der Südwestschweiz bis an das Wiener Becken im Osten erstreckt.

Die Sedimente des Vorlandbeckens erreichen am Alpenrand 5000 bis 6000 m, im Norden noch einige 100 m. Die Korngrößen nehmen in dieser Richtung ab, von Konglomeraten am Alpenrand über Sandsteine bis hin zu tonig-mergeligen Sedimenten am Nordrand des Beckens.

Stratigraphie der Molasse

Durch wechselnd marine und festländische Ablagerungsbedingungen entstanden aus dem Abtragungsschutt der aufsteigenden Alpen unterschiedliche Sedimente, die in Untere Meeresmolasse, Untere Süßwassermolasse, Obere Meeresmolasse und Obere Süßwassermolasse unterteilt werden. Im Allgemeinen sind die marinen Sedimente der Meeresmolasse als mächtige, gut gebankte Sandsteine, Tone oder Mergel ausgebildet. In den Süßwasserbildungen findet man eher schräg geschichtete Sandsteine und rote Tone und Mergel.

Die Untere Meeresmolasse entstand im Unteroligozän in einem tiefen Binnenmeer und wird von feinen Sandsteinen, Tonen und Mergeln aufgebaut. Es folgte eine Hebung des Vorlandbeckens und ein allgemeiner Meeresspiegelrückgang, so dass in festländischen Ablagerungsverhältnissen die Untere Süßwassermolasse entstand. Unmittelbar am Alpennordrand wurden große Schuttfächer mit Geröllen aufgeschüttet, der sogenannte Nagelfluh. Diese Konglomerate haben je nach Liefergebiet eine große Variationsbreite an Geröllen, Sortierung und Bindemitteln. Im weiteren Becken entwickelten sich verwilderte Flusssysteme, wodurch schräg geschichtete Sandsteine sowie Mergel und Tone entstanden.

Nach einer erneuten Absenkung wurden im mittleren Miozän in dem neu entstandenen Meeresbecken die Sedimente der oberen Meeresmolasse gebildet. Es handelt sich wieder um feinkörnige Sande und Mergel. Abgesehen von den Hauptliefergebieten in den Alpen wurden auch Sedimente aus dem Bereich des Juragebirges geliefert, so dass im Norden des Molassebeckens kleinere Nagelfluhfächer in südliche Richtung geschüttet wurden. Im oberen Miozän wurden nach der Hebung des Beckens die Sedimente der Oberen Süßwassermolasse abgelagert. Die Nagelfluhfächer am Alpennordrand erreichen gewaltige Mächtigkeiten, wie z.B. der Hörnlfächer mit 1500 m. Aus dem Hegau-Vulkanismus im Norden finden sich in der Oberen Süßwassermolasse Tufflagen.

Die subalpine Molasse

Mit der letzten Deformationsphase der Alpen wurden die helvetischen Decken am Alpennordrand um 15-25 km nach Norden auf die Sedimente der Molasse überschoben. Die Molasse wurde nicht nur von dem Deckenstapel überfahren sondern an der Überschiebungsfrent auch verfaltet und zerschert.

4.1.4 Alpen

Die Alpen nehmen einen großen Teil des Landes ein. Sie schließen sich südöstlich an das Mittelland an. Landschaftlich grenzen sie sich deutlich von den übrigen Regionen der Schweiz ab. Die Gegend ist geprägt durch spektakuläre Hochgebirgszüge und steil eingeschnittene Täler und Schluchten. Die Besiedelung beschränkt sich im Wesentlichen auf die größeren Täler.

Im Mesozoikum entstanden die sedimentären Abfolgen, die heute in den Alpen aufgeschlossen sind, im Ablagerungsbereich der Tethys. Vor etwa 120 bis 100 Ma begann die Konvergenz zwischen der afrikanischen und der europäischen Platte, die zur Schließung der Tethys und zur Kollision der Kontinente führte (EISBACHER, 1996). Die Folge waren komplexe Faltungen und weite Deckenüberschiebungen, die zum Aufbau des alpidischen Orogens führten. Durch anschließende Hebungs- und Erosionsvorgänge entstand schließlich das markante Erscheinungsbild dieses Hochgebirges.

Die Alpen werden nach heutigem Kenntnisstand in vier große Deckeneinheiten eingeteilt: die Helvetische, die Penninische, die Ostalpine und die Südalpine Decke. Zusätzlich können vier große Zentralmassive abgegrenzt werden, die nicht in den Deckenbau mit einbezogen wurden. Die verschiedenen Deckeneinheiten repräsentieren jeweils charakteristische Ablagerungsräume der Tethys. Abb. 4.2 zeigt die paläogeographische Rekonstruktion des Ablagerungsraumes (a) und die heutige Lage der einzelnen genannten Decken (b) (nach EISBACHER, 1996).

Zentralmassive

Man unterscheidet das Aarmassiv in der Zentralschweiz, das Gotthardmassiv, das sich unmittelbar südlich anschließt, das Aiguilles Rouges/Arpille-Massiv im Süden der Schweiz bei Chamonix und das südöstlich davon gelegene Mont Blanc-Massiv. Hier findet man das kristalline Grundgebirge mit mehr oder weniger metamorpher Überprägung. Die vorherrschenden Gesteine sind Gneise und Granite, aber auch Amphibolite, Glimmerschiefer und Ophiolithe. Untergeordnet trifft man Quarzite, Marmor, Kalksilikatfelsen und Ganggesteine wie Pegmatite und Aplite (zum Teil mit nennenswerten Vererzungen) an.

Diese Grundgebirgsaufschlüsse sind dem europäischen Kontinent zuzuordnen und daher mit den Vorkommen der variszischen Mittelgebirge (z.B. Schwarzwald und Vogesen) sowie des Mittellandes und des Schweizer Jura vergleichbar.

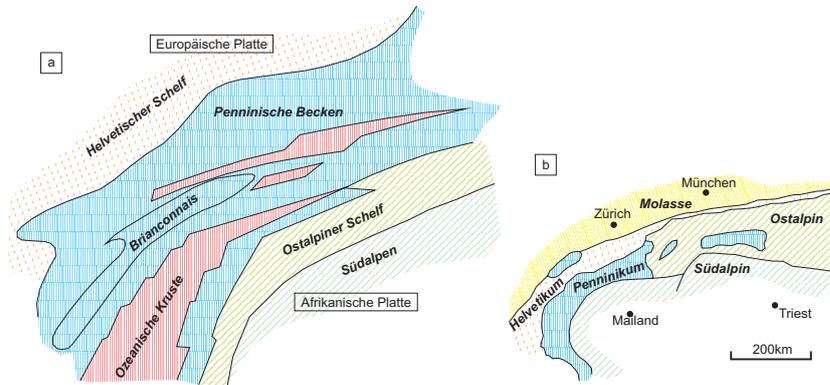


Abbildung 4.2: Ablagerungsräume in der Tethys (a) und die heutige Abgrenzung der daraus entstandenen tektonischen Deckeneinheiten (b) (nach EISBACHER, 1996).

Helvetische Decken

Die Helvetischen Decken sind in einem WSW-ENE verlaufenden Band parallel zum Mittelland als nordwestlichster Deckenstapel der Alpen zu finden (Abb. 4.2). Tektonisch liegen diese Einheiten gegenüber den übrigen Decken am tiefsten. Der helvetische Ablagerungsraum befand sich auf dem europäischen Schelf am Nordrand der Tethys. Daher ist die Stratigraphie der des Jura gebirges sehr ähnlich. Nur in den distalen Bereichen des Ultrahelvetikums nehmen die Ton- und Mergelanteile zu und es treten Flysche auf.

Die Faltung ist wie auch im Jura durch Kompetenzunterschiede geprägt, wobei in den Alpen die Verformung aufgrund der größeren Überdeckung weniger bruchhaft erfolgte.

Penninische Decken

Die Penninischen Decken liegen heute südlich der Rhone, im Nordtessin und im westlichen Graubünden aufgeschlossen (Abb. 4.2). Ihre Sedimente stammen aus dem tieferen Meeresbecken und sind dadurch vornehmlich tonig geprägt. Die bekanntesten Gesteine des Penninikums sind die Kalk- und Tonschiefer des sogenannten Bündnerschiefer. Sie sind vergesellschaftet mit ophiolithischen Gesteinen, die die Überreste der ozeanischen Krustenbereiche

4 Geologischer Überblick

darstellen. Aus dem flacheren Ablagerungsbereich der Briançonnais-Schwelle stammen Kalke und Breccien. Im Penninikum wurden Gneise des Grundgebirges in die Faltung mit einbezogen.

Ostalpine Decken

Auf dem Schelf des afrikanischen Kontinents wurden die Sedimente der Ostalpinen Decken abgelagert (Abb. 4.2). Sie unterscheiden sich deutlich vom Mesozoikum des europäischen Schelfs. Die Trias ist vollständig marin ausgeprägt. Dolomite und Kalke, zum Teil mit viel Riffmaterial, wurden in beachtlichen Mächtigkeiten von mehreren Kilometern im Flachwasser abgelagert. Im Ostalpin sind wie auch im Penninikum Kristallin und Metamorphite enthalten, darunter Gneise, Glimmerschiefer, Granite, Syenite, Diorite und Gabbros (Unterostalpin), sowie hochmetamorphe Tonschiefer (Glimmerschiefer), Gneise, Serpentine, Eklogite und Amphibolite (Oberostalpin).

Südalpine Decken

Diese Einheiten finden sich in der Schweiz nur in einem sehr kleinen Areal südlich der Wurzelzone der Alpen (insubrische Linie). Der größere Teil dieser Decken liegt in Italien. Es handelt sich um die Ablagerungen am passiven Kontinentalrand Nordafrikas bei beginnendem Rifting (Abb. 4.2). Kontinentales Grundgebirge, permische Vulkanite und Mesozoikum sind erhalten und mit verfaltet.

4.2 Das westliche Baden-Württemberg

4.2.1 Übersicht

Im äußersten Westen des Landes Baden-Württemberg erstreckt sich der Oberrheingraben mit einer Gesamtlänge von fast 300 km und etwa 35 bis 40 km Breite (Abb. 4.3). Er verläuft in NNE-SSW-Richtung (rheinisches Streichen). Im Westen schließt sich das Mittelgebirge des Schwarzwaldes an. Entlang des Grabenrandes ist der Übergang vom Oberrheingraben zum Schwarzwald morphologisch sehr deutlich ausgeprägt. Während der Oberrheingraben eine

4.2 Das westliche Baden-Württemberg

weite Ebene darstellt, steigen die Westhänge des Schwarzwaldes steil empor. Die nachstehenden Beschreibungen folgen den Darstellungen von HENNINGSSEN & KATZUNG (1998), WALTER (1995) und GEYER & GWINNER (1991). Abb. B.2 im Anhang B zeigt die geologische Übersichtskarte.



Abbildung 4.3: Übersichtskarte westliches Baden-Württemberg mit Ausdehnung von Schwarzwald und Oberrheingraben (nach GEYER & GWINNER (1991)).

4.2.2 Schwarzwald

Im Westen ist der Schwarzwald durch die Grabenrandverwerfung des Oberrheingrabens und im Süden durch den Rhein selbst deutlich abgegrenzt. Im Norden und Osten ist die Umrandung weniger deutlich, da die Gesteine allmählich unter die jüngeren Sedimente des Kraichgaus und der Schwäbischen Alb abtauchen. Die höchste Erhebung stellt der Feldberg mit 1493 m dar.

In weiten Bereichen des Schwarzwaldes steht an der Oberfläche das Grundgebirge an. Sedimentäre Überdeckungen treten hauptsächlich im Norden und

Osten auf. Die Gesteine des Grundgebirges werden zusammengefasst als Gneise und Granite bezeichnet, wobei aber weitere Unterscheidungen möglich sind. Im zentralen Schwarzwald kommen Para- und Orthogneise vor. Zum Teil sind verschiedene Phasen von Aufschmelzung (Anatexis) nachweisbar. Unter dem Oberbegriff der variszischen Granite werden zum Teil auch Granodiorite und Diorite geführt, die zu Zeiten des Devon und Karbon ins Grundgebirge intrudierten. Stark basische Gesteine wie Eklogite und Amphibolite kommen nur sehr selten vor.

Die Beschränkung der mesozoischen Sedimentgesteine auf den Norden und Nordosten des Schwarzwaldes ist durch die ungleichmäßige Hebung des Gebirges bedingt. Insgesamt ist der südliche Teil des Gebirges stärker gehoben worden, wodurch einerseits höhere Erhebungen entstanden, gleichzeitig durch die stärkere Erosion tiefere Krustenniveaus aufgeschlossen wurden.

Die ältesten Ablagerungen auf dem Grundgebirge stammen bereits aus dem Karbon. Hierbei handelt es sich in erster Linie um Grauwacken mit kleinen Kohlevorkommen, die in Senken abgelagert wurden. Darauf folgen klastische Sedimente des Rotliegend. Sie füllten das damals bestehende Relief zunehmend auf, doch blieben die einzelnen Vorkommen größtenteils voneinander isoliert. Die Vorkommen konzentrieren sich auf die Tröge der Baden-Badener Senke, der Weiler-Offenburg-Teinacher Senke und der Burgund-Breisgau-Senke. Bei den Gesteinen des Rotliegend handelt es sich überwiegend um rote Sandsteine, Konglomerate, Fanglomerate und Arkosen. Aus dem späten Paläozoikum sind außerdem Vulkanite (Ignimbrite, Porphyre) erhalten.

Im Buntsandstein entstanden im Bereich des Schwarzwaldes bis 200 m mächtige, rotgefärbte Sandsteinsfolgen in einem festländisch geprägten, ariden Ablagerungsbereich. Das Zentrum der Sedimentation lag einige hundert Kilometer weiter im Norden, wo in der Norddeutschen Senke über 1000 m mächtige, flachmarine Sandsteine abgelagert wurden. Die Buntsandsteine im Schwarzwald sind oft schräggeschichtet. Die Mächtigkeiten nehmen nach Norden hin zu. Immer wieder treten Hinweise auf Bodenbildung (sog. Violette Horizonte) oder geröllführende Schichten wie z. B. das Eck'sche Konglomerat (Unterer Buntsandstein) oder das Hauptkonglomerat (Mittlerer Buntsandstein) auf. Im Oberen Buntsandstein deutet sich der Wechsel der Ablagerungsbedingungen zum flachmarinen Milieu durch dünnbankige Sandsteine und Tonsteine (Röttonen) an.

Im Norden tauchen die Schichten der Buntsandsteins unter den Muschelkalk

und Keuper der Kraichgausenke ab. Das Muschelkalkmeer erstreckte sich über ganz Deutschland und auch über Bereiche der Nachbarländer. Dadurch können die Gesteinsfolgen über größere Distanzen verglichen und korreliert werden. Wie in der Schweiz findet man daher auch in Südwestdeutschland aus dem Muschelkalk mächtige Kalksteinfolgen mit Einschaltungen von Salzgesteinen und Dolomiten. Im Übergang zum Keuper nimmt der Tongehalt der Sedimente zu und es entstehen eher mergelige Folgen. Im westlichen Baden-Württemberg ist die Trias also ebenfalls in Germanischer Fazies abgelagert worden. In weiten Bereichen sind die jüngeren Schichten jedoch nicht erhalten.

4.2.3 Oberrheingraben

Der Oberrheingraben liegt als weite Ebene zwischen Schwarzwald, Kraichgau und Odenwald im Osten und den Vogesen und dem Pfälzer Bergland im Westen. Die höchste Erhebung stellt der Kaiserstuhl mit 557 m ü NN im Süden bei Freiburg dar.

Der Oberrheingraben begann im Eozän einzubrechen. Zunächst war die Absenkung im Süden stärker als im Norden, nach und nach verlagerte sich das Ablagerungszentrum aber nach Norden. Im Mitteloigozän kam es erstmals zur vollständigen Überflutung des Grabenbereichs. Die tertiären und quartären Sedimente erreichen um Mannheim die größten Mächtigkeiten mit mehr als 3000 m. Die Mächtigkeiten nehmen nach Süden und zum Grabenrand hin ab. Die Randverwerfung wird von Staffelbrüchen begleitet, so dass an den Grabenrändern auf Hochschollen zum Teil noch Tertiär anstehend zu finden ist, während es im Graben von quartären Ablagerungen überdeckt wird.

Die Gesteine des Tertiär sind überwiegend marin-brackisch geprägt, im Oberoligozän auch limnisch fluviatil. Es wurden vor allem Mergel und Tone gebildet, aber auch Kalke und in den Randbereichen Konglomerate aus dem Abtragungsschutt der angrenzenden Hochschollen. Im Süden des Grabens in der Nähe von Freiburg zeugt der Kaiserstuhl vom tertiären Vulkanismus, der mit der Grabenbildung unmittelbar in Verbindung zu bringen ist.

Das Quartär des Oberrheingrabens wird dominiert von den fluviatilen Ablagerungen des Rheins und seiner Zuflüsse. Da sich das Meer bereits im jüngsten Tertiär zurückgezogen hatte, ist die Grenze zwischen Jungtertiär und Alttertiär lithologisch schwer zu definieren. Die pleistozäne Sedimentation wurde stark beeinflusst von den glazialen Vorgängen in den Alpen und im Alpenvorland,

4 Geologischer Überblick

woher große Mengen an Schmelzwasser und Sedimentfracht bezogen wurden. Die Quartärmächtigkeiten sind im Norden und im Süden des Grabens am größten (> 200 m), im mittleren Grabenabschnitt betragen sie oft nur wenige Zehnermeter. Zwischen den mächtigen Kieslagern des Pleistozän sind feinere, schluffig-tonige Horizonte eingeschaltet. Diese sind nicht über den kompletten Grabenbereich ausgeprägt, bewirken aber vielerorts eine Stockwerksgliederung des Grundwassers. Im Süden fehlen diese Trennschichten in der Regel. Besonders an der Westflanke des Schwarzwaldes und um den Kaiserstuhl herum entstanden durch äolischen Transport nennenswerte Lößvorkommen.

5 Vorgehen zur Entwicklung neuronaler Netze

5.1 Vorverarbeitung der Daten

5.1.1 Dateneingabe und -manipulation

Vor der Analyse müssen die Daten vorbereitet werden. Neben der Formatierung muss die Vollständigkeit und Konsistenz des zu verwendenden Datensatzes sicher gestellt werden. Zu allen Anlagen werden alle Variablen, von denen eine Relevanz für die Fragestellung nicht auszuschließen ist, in einer Tabelle erfasst. Jeder der 13 Bodentypen wird als eine Variable aufgenommen, die den Wert der Mächtigkeit in m erhält. Da der Typ *Festgestein mit hoher WLF* bei keiner der vorliegenden Anlagen vorkommt, reduziert sich die Anzahl der Bodentypen auf zwölf.

Die Gesteine *Granit*, *Basalt*, *Gneis* und *Festgestein oder wasserführendes Lockergestein* kommen nur in wenigen Bohrprofilen vor (Abb. 5.1). Die weiteren Analysen wurden deshalb auf die übrigen Sedimente und Sedimentgesteine reduziert. Anlagen mit den genannten Gesteinen wurden aus dem Datensatz eliminiert. Der reduzierte Datensatz der Sedimentgesteine enthält 57 Anlagen.

In den Originaldaten zu den Erdwärmesonden sind die kumulativen Mächtigkeiten pro Sonde angegeben (vgl. Abb. 3.11). Diese wird mit der Sondenanzahl multipliziert, um die gesamte wirksame Mächtigkeit zu erhalten (Variablen BT01 bis BT13, siehe Anhang).

Für die Analyse mit neuronalen Netzen müssen alle Eingabegrößen metrisch sein. Die meisten Größen liegen metrisch vor, eine Ausnahme stellt die Art der Warmwasserbereitung dar. Die Codierung hierfür gibt Tabelle 5.1 an.

Als abhängige Größe zur Beurteilung der Effizienz der Erdwärmesonde wird die Soletemperatur gewählt. Diese hängt unmittelbar von den thermischen Ei-

5 Vorgehen zur Entwicklung neuronaler Netze

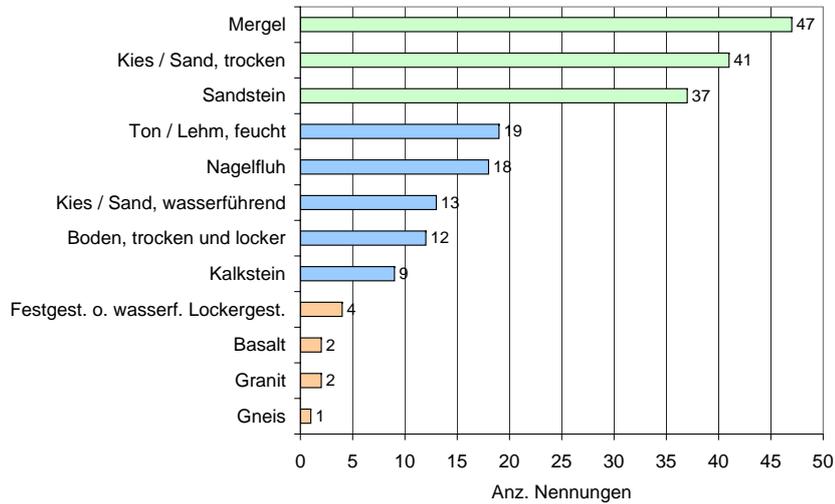


Abbildung 5.1: Anzahl der Nennungen der Gesteinsarten in den Bohrprofilen (rot: geringe, blau: mittlere, grün: große Häufigkeit).

genschaften des Untergrundes ab. Die Jahresarbeitszahl dagegen wird zusätzlich von vielen anlagenseitigen Parametern beeinflusst. Zur Untersuchung des Untergrundeinflusses ist die Soletemperatur deshalb besser geeignet. Da die Messungen der Soletemperatur in FAWA zu unterschiedlichen Jahreszeiten und bei verschiedenen Jahresmitteltemperaturen stattgefunden haben, wird eine Normierung vorgenommen, die auch von ERB et al. (2004) beschrieben wird: Aufgrund der Korrelation der Soletemperatur mit der Außentemperatur wird durch lineare Regression die zu erwartende Soletemperatur bei einer Außentemperatur von 3°C berechnet. Diese normierte Quelltemperatur kann als Vergleichsgröße zwischen den Anlagen herangezogen werden. Abb. 5.2 zeigt

Tabelle 5.1: Codierung der Art der Warmwasserbereitung.

Warmwasserbereitung	Variablenwert
ausschließlich Wärmepumpe	1
Wärmepumpe und andere (z.B. Elektro, Solar)	0,5
ohne Wärmepumpe	0

beispielhaft die Korrelationen von Außentemperatur und Quelltemperatur von den Anlagen 1109 und 1049. Bei Anlagen mit schlechteren Korrelationen weicht die normierte Temperatur nur wenig vom Mittelwert der gemessenen Soletemperaturen ab.

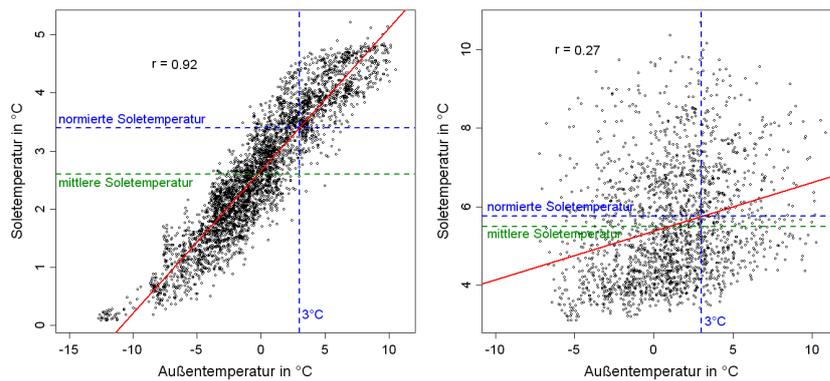


Abbildung 5.2: Berechnung der normierten Soletemperatur aus der Abhängigkeit zwischen Außentemperatur und Soletemperatur. Links: bei guter Korrelation ($r = 0,92$) von Anlage 1109. Mittelwert der Soletemperatur: $2,6^{\circ}\text{C}$, normierte Soletemperatur = $3,4^{\circ}\text{C}$. Rechts: bei schlechter Korrelation ($r = 0,27$) von Anlage 1049. Mittelwert der Soletemperatur: $5,5^{\circ}\text{C}$, normierte Soletemperatur = $5,8^{\circ}\text{C}$.

In einigen Fällen werden für bestimmte Variablen wegen fehlender Informationen Werte angenommen, die bei Kenntnis der Hintergründe und unter Betrachtung der vorliegenden Daten realistisch sind. Bei den Anlagen 2074 und 2094 fehlen in den Originaldaten Angaben über die Rohrdurchmesser. Da diese Sonden nur 90 m tief sind, wird ein Rohrdurchmesser von 32 mm angenommen, da größere Durchmesser in der Regel erst bei Tiefen ≥ 180 m verwendet werden (Abb. 5.3). Bei Anlage 3039 liegt keine Jahresmitteltemperatur vor. Da diese im Allgemeinen gut mit der topographischen Höhe der Anlagen linear korreliert, wird entsprechend dem linearen Modell aus der Höhe von 595 m ü NN ein Wert von $8,1^{\circ}\text{C}$ als Jahresmitteltemperatur berechnet. Formel und Korrelationskoeffizient r sind Abb. 5.4 zu entnehmen. Wo keine Angaben über den Gehalt an Frostschutzmittel vorliegen (7 Fälle) wird der Median der vorhandenen Daten von 25 % angenommen.

ERB et al. (2004) beschreiben in ihrer FAWA-Studie drei verschiedene Jahresarbeitszahlen, die sich jeweils in der Definition der Systemgrenzen unter-

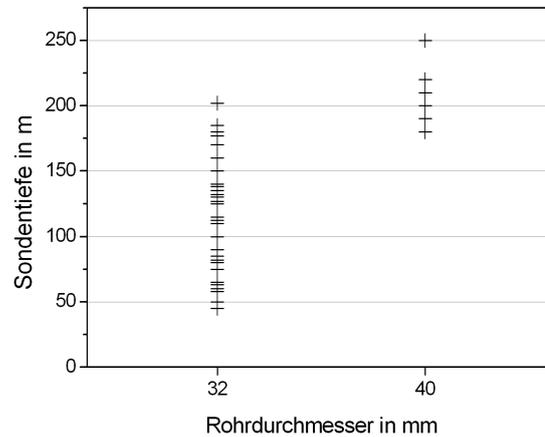


Abbildung 5.3: Zusammenhang zwischen Rohrdurchmesser und Tiefe der Erdwärmesonde. 40 mm Durchmesser werden erst für Sonden ab etwa 180 m Tiefe verwendet.

scheiden. Die im Folgenden verwendete Jahresarbeitszahl (JAZ) entspricht der JAZ1 in der FAWA-Studie. Diese wurde berechnet aus der Wärmemenge ab Wärmepumpe ohne Speicherverluste und der elektrischen Energie für Wärmepumpe und Hilfsaggregate wie Umwälzpumpen (nach Gleichung 2.2). Aus der mittleren bereitgestellten Wärmemenge pro Jahr (mQ) und der mittleren Jahresarbeitszahl (JAZ) wird die mittlere geothermisch bereitgestellte Wärmemenge mQ_{geo} pro Jahr berechnet:

$$mQ_{geo} = mQ - \frac{mQ}{JAZ} \quad (5.1)$$

Es wird ein Datensatz erstellt mit 57 Fällen, 20 unabhängigen und einer abhängigen Variable (normierte Quelltemperatur). Die unabhängigen Variablen sind:

- Heizleistung der Wärmepumpe HLWP
- Art der Warmwasserbereitung WWB
- mittlere bereitgestellte Wärmemenge pro Jahr mQ
- mittlere Jahresarbeitszahl JAZ

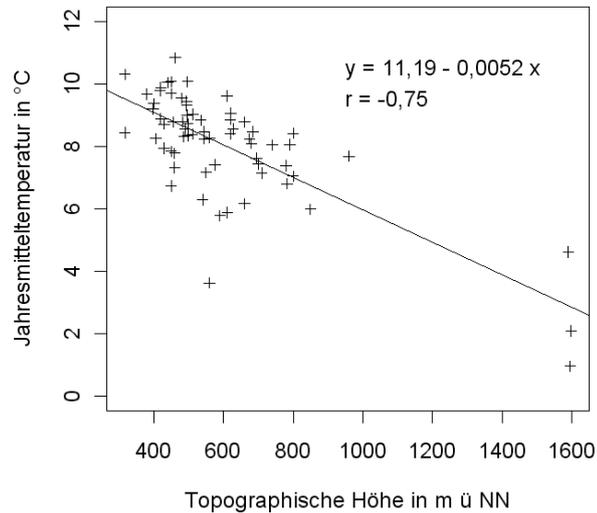


Abbildung 5.4: Zusammenhang zwischen topographischer Höhe und Jahresmitteltemperatur aller Anlagen.

- mittlere geothermisch bereitgestellte Wärmemenge pro Jahr mQ_{geo}
- Auslastung bei Auslegebedingungen Ausl
- Jahresmitteltemperatur JMT
- Mittlere Vorlauftemperatur des Heizungssystems T_{VL}
- Durchmesser der Sondenrohre RD
- Gehalt an Frostschutzmittel FSG
- Sondenanzahl SZ
- Sondentiefe D
- wirksame Mächtigkeiten von 8 Gesteinsarten BT01 bis BT13

Bei mehr als der Hälfte der Anlagen werden keine Angaben zu den Grundwasserhältnissen gemacht. Deshalb kann dieser Parameter nicht weiter berücksichtigt werden.

5.1.2 Normierung

Um mit dem erarbeiteten Datensatz neuronale Netze zu trainieren, werden die Werte x der Variablen auf den Zahlenbereich $[0,1]$ skaliert. Da Extremwerte das Training erschweren und um geringe Extrapolation zu ermöglichen (SHIGIDI & GARCIA, 2003), wird so skaliert, dass für die Spanne d der Codierung der real vorkommende Zahlenbereich um einen Puffer von $\pm 5\%$ der Extremwerte erweitert wird.

5.2 Datenpartitionierung

Der Umfang der verschiedenen Teildatensätze für Training, Test und Validierung wird im ersten Schritt in Anlehnung an BOWDEN et al. (2002) und SHAHIN et al. (2004) festgelegt. Es werden 29 Anlagen für das Training, 17 Anlagen als Testdaten und 11 zur Validierung verwendet. Da der Gesamtumfang der Daten eher gering ist, wird die Aufteilung der Daten im ersten Schritt so vorgenommen, dass die Fälle mit den Extremwerten aller Variablen dem Trainingsdatensatz zugeordnet werden, damit das Netz für einen möglichst großen Geltungsbereich trainiert und größere Extrapolationen vermieden werden können (FLOOD & KARTAM, 1994; BOWDEN et al., 2002). Die übrigen Fälle werden zufällig verteilt.

Mit einer Netzwerkarchitektur mit geringem mittleren quadratischen Fehler der Ausgabe (IIa mit 13 Eingabeneuronen, vgl. 5.4.1) werden alternative Partitionierungen getestet. Hierzu wird ein höherer Anteil der Daten dem Trainingsdatensatz zugeordnet (39 Muster) und nur jeweils 9 Anlagen für Test und Validierung verwendet. Bei dieser Partitionierung werden die Trainingsmuster einmal rein zufällig ausgewählt und einmal wie im ersten Schritt die Extremwerte vorher gezielt in die Trainingsdaten sortiert. Bei der vollständig zufälligen Auswahl wird mit Hilfe des Kruskal-Wallis-Tests überprüft, ob davon ausgegangen werden kann, dass die erzeugten Teildatensätze die gleiche Grundgesamtheit repräsentieren. Der Test untersucht zwei oder mehrere Stichproben mit freier Verteilung (keine Normalverteilung vorausgesetzt) auf Lageunterschiede. Die Nullhypothese geht von gleicher Verteilung aus.

Mit Hilfe eines VBA-Makros werden die Datensätze von der Tabellenform in ASCII-Files exportiert und so formatiert, dass sie vom verwendeten Neuronale-Netze-Simulator (JavaNNS, FISCHER et al.) weiter verarbeitet werden können.

5.3 Training neuronaler Netze

Mit den unterschiedlichen Trainingsdatensätzen werden künstliche Neuronale Netze mit verschiedenen Topologien trainiert. Für jeden Eingabevektor werden mehrere Trainingsdurchgänge ausgeführt, wobei die initialen Gewichte, die Trainingsparameter und der Abbruchzeitpunkt variiert werden. Der optimale Zeitpunkt zum Abbruch des Trainings wird durch Kreuzvalidierung aus der Fehlerkurve der Testdaten bestimmt. Es werden die Lernverfahren *Backpropagation* und *Backprop-Momentum* angewendet. Die jeweils verfügbaren Trainingsparameter werden so variiert, dass der Fehler der Trainingsdaten möglichst kontinuierlich minimiert wird und das Minimum der Fehlerkurve der Testdaten möglichst niedrig ist. Die Netze mit ihren erlernten Gewichten werden nach unterschiedlich vielen Trainingsdurchläufen gespeichert, um die Performance der Netze zusätzlich durch die Berechnung der Validierungsdaten zu überprüfen. Die Netze mit den besten Validierungsergebnissen werden dann weiter ausgewertet.

5.4 Netzwerkoptimierung

5.4.1 Eingabemuster

Ziel der Optimierung sind möglichst kleine Eingabemuster (vgl. Abschnitt 2.3.2), aus denen die normierte Soletemperatur so präzise wie möglich berechnet werden kann. Kleine Eingabemuster verringern den Aufwand der Dateneingabe und machen das System übersichtlicher. Neben der Präzision der Ausgabe muss aber auch die Plausibilität der Abhängigkeiten von Ein- und Ausgabe überprüft werden. Alle Eingabemuster der Hauptanalyseschritte sind in Tabelle 5.2 dargestellt. Die Anzahl der verdeckten Neuronen in ein oder zwei verdeckten Zwischenschichten wird jeweils variiert (s. Abschnitt 5.4.2).

In der ersten Stufe (Ia) wird eine Maximallösung hinsichtlich der Anzahl der Eingabeparameter gewählt, die alle primären (nicht weiter verarbeiteten) Größen enthält.

Im nächsten Schritt (Ib) werden solche Parameter, von denen nur ein geringer Einfluss erwartet wird (Rohrdurchmesser, Sondenzahl), oder die mit anderen Größen korrelieren, aus dem Eingabemuster eliminiert. Die mittlere Vorlauf-temperatur des Heizungssystems mT_{VL} wirkt sich unmittelbar auf die Jahresar-

5 Vorgehen zur Entwicklung neuronaler Netze

Tabelle 5.2: Eingabemuster der Hauptanalyseschritte

Analyseschritt	I		II					III	
	a	b	a	b	c	d	e	a	b
HLWP	×								
WWB	×	×	×		×	×	×	×	×
mQ	×	×							
mQ_{geo}			×	×	×	×	×	×	×
JAZ	×	×							
Ausl	×	×	×	×		×	×	×	×
JMT	×	×	×	×	×		×	×	
mT_{vL}	×								
RD	×								
FSG	×	×							
SZ	×								
SL								×	×
D	×	×	×	×	×	×			×
BT01	×	×	×	×	×	×	×		
BT04	×	×	×	×	×	×	×		
BT05	×	×	×	×	×	×	×		
BT06	×	×	×	×	×	×	×		
BT07	×	×	×	×	×	×	×		
BT08	×	×	×	×	×	×	×		
BT12	×	×	×	×	×	×	×		
BT13	×	×	×	×	×	×	×		
Anzahl input	19	15	13	12	12	12	12	5	5

beitszahl aus und wird deshalb entfernt. ERB et al. (2004) empfehlen auf der Grundlage ihrer Studie die jährliche Wärmemenge als Auslegegröße statt der häufig verwendeten Heizleistung der Wärmepumpe. Deshalb wird für Ib die Heizleistung nicht ins Training einbezogen.

Für die nächsten Stufen der Analyse werden die Eingabemuster weiter verkleinert. Statt der bereitgestellten Wärmemenge und der Jahresarbeitszahl wird die mittlere geothermisch bereitgestellte Energie mQ_{geo} verwendet. Der Frostschutzgehalt im Sondenfluid wird ebenfalls nicht weiter berücksichtigt. Aus dem verkleinerten Eingabemuster von Analyse IIa mit 13 Eingabeneuronen wird dann in den Schritten IIb bis IIe jeweils ein Parameter aus WWB, Ausl, JMT und D entfernt und neu trainiert.

Die Analyse III dient der Überprüfung, ob die Soletemperatur auch ohne die

Berücksichtigung der Lithologien nur aus der Sondenlänge, bzw. aus Sondenlänge und Endteufe prognostiziert werden kann.

5.4.2 Anzahl verdeckter Neuronen

In Anlehnung an HECHT-NIELSEN (1987) enthält in den ersten Analysen (I) das größte Netzwerk 39 Neuronen in einer verdeckten Zwischenschicht. MAREN et al. (1990) beschreiben, dass die optimale Anzahl der verdeckten Neuronen meist geringer ist, als die der Eingabeneuronen. Daher werden Netze mit 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 und 18 verdeckten Neuronen trainiert. Entsprechend der Empfehlungen von MAREN et al. (1990) für kontinuierliche Ausgabefunktionen (vgl. Abschnitt 2.3.2) wird ein zweistufiges Netz mit 12 Neuronen in der ersten und 4 in der zweiten verdeckten Schicht trainiert.

Da die Verwendung einer zweiten Zwischenschicht keine Verbesserung der Ergebnisse bringt, werden in den Analysegruppen II und III nur noch Netze mit einer Zwischenschicht trainiert. Hinsichtlich der Anzahl der Neuronen in der Zwischenschicht sind solche Netze, bei denen diese Zahl etwa der Anzahl der Eingabegrößen entspricht oder wenig geringer ist, in den I-Analysen am erfolgreichsten. Deshalb betrachten die nachfolgenden Analysen nur noch Topologien, die diesen Kriterien entsprechen.

5.4.3 Validierung

Zur Bewertung der Güte eines trainierten neuronalen Netzes dient in erster Linie der mittlere quadratische Fehler der Ausgabe der Validierungsdaten. Die Validierungsdaten werden während des Trainings nicht berücksichtigt und erst im Anschluss dem trainierten neuronalen Netz präsentiert. Die Soletemperatur wird in codierter Form vom Netz berechnet. Die Ausgabedateien werden zunächst umformatiert, um dann mit der Statistik-Software R weiterverarbeitet zu werden. Das heißt, die normierten Ergebnisse werden in Temperaturen zurück gerechnet und anschließend die berechneten den realen Werten der Soletemperatur gegenüber gestellt. Als Gütekriterium dient der mittlere quadratische Fehler MSE nach Gleichung 5.2:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_{calc} - T_{real})^2 \quad (5.2)$$

Hierbei sind T_{calc} die vom neuronalen Netz berechnete, T_{real} die reale Temperatur und n die Anzahl der Muster im Validierungsdatensatz.

Die Übereinstimmung von Berechnung und Messwert kann darüber hinaus veranschaulicht werden, indem die berechneten über die realen Werte geplottet werden und eine Ausgleichsgerade durch die Punkte berechnet wird. Dieser Zusammenhang wird durch einen Achsenabschnitt b , eine Steigung m und einen Korrelationskoeffizienten r beschrieben. Im Falle einer hundertprozentigen Übereinstimmung von realen und berechneten Temperaturen würde gelten:

$$\begin{aligned}b &= 0 \\m &= 1 \\r &= 1\end{aligned}$$

Zum Vergleich verschiedener Partitionierungen sollte außerdem die Varianz oder Standardabweichung der realen Soletemperaturen berücksichtigt werden. Wenn alle Extremwerte in die Trainingsdaten sortiert werden, ist durch die geringere Varianz s^2 der Temperaturen innerhalb der Validierungsdaten automatisch ein geringerer MSE zu erwarten. Daher sollte der MSE hier nicht als alleiniges Gütekriterium herangezogen werden, sondern auch das Verhältnis $\frac{MSE}{s^2}$.

5.4.4 Sensitivitätsanalysen

Um herauszufinden, wie stark bei Netzen mit geringen MSE die Abhängigkeit der Soletemperatur von den einzelnen Eingabeparametern ist, werden die Eingabemuster der Validierungsdaten manipuliert. Jede Variable wird in einem festgelegten, realistischen Intervall variiert und die normierte Soletemperatur mit dem neuronalen Netz neu berechnet. Tabelle 5.3 zeigt die Variationsbreiten der Eingangsgrößen. In diesen Sensitivitätsanalysen wird außerdem überprüft, ob der generelle Trend der Abhängigkeit der Soletemperatur von der jeweiligen Eingabegröße plausibel ist.

Tabelle 5.3: Variationen der Eingabeparameter für Sensitivitätsanalysen.

	Einheit	min	max	Variation des Variablenwerts
HLWP	kW	5,5	23,3	-30% / -20% / -10% / +10% / +20% / +30%
WWB	-	0	1	0 / 0,5 / 1
mQ	kWh	8674	41801	-30% / -20% / -10% / +10% / +20% / +30%
mQgeo	kWh	6164	28413	-30% / -20% / -10% / +10% / +20% / +30%
JAZ	-	2,2	5,3	-30% / -20% / -10% / +10% / +20% / +30%
Ausl	-	0,37	1,09	-30% / -20% / -10% / +10% / +20% / +30%
JMT	°C	2,1	10,9	-3 K / -2 K / -1 K / +1 K / +2 K / +3 K
mTvL	°C	25,5	48,7	-3 K / -2 K / -1 K / +1 K / +2 K / +3 K
RD	mm	32	40	32 / 40
FSG	%	0	33	-30% / -20% / -10% / +10% / +20% / +30%
SZ	-	1	4	1 / 2 / 3 / 4
D	m	45	250	-30% / -20% / -10% / +10% / +20% / +30%
BT01	m	0	10	0 / 2 / 4 / 6 / 8 / 10
BT04	m	0	123	-20 / -10 / -6 / -4 / -2 / +2 / +4 / +6 / +10 / +20
BT05	m	0	114	-20 / -10 / -6 / -4 / -2 / +2 / +4 / +6 / +10 / +20
BT06	m	0	296	-20 / -10 / -6 / -4 / -2 / +2 / +4 / +6 / +10 / +20
BT07	m	0	80	-20 / -10 / -6 / -4 / -2 / +2 / +4 / +6 / +10 / +20
BT08	m	0	172	-20 / -10 / -6 / -4 / -2 / +2 / +4 / +6 / +10 / +20
BT12	m	0	218	-20 / -10 / -6 / -4 / -2 / +2 / +4 / +6 / +10 / +20
BT13	m	0	166	-20 / -10 / -6 / -4 / -2 / +2 / +4 / +6 / +10 / +20

6 Ergebnisse und Interpretation der KNN-Analysen

6.1 Ergebnisse

Es wurden über 2000 trainierte Netze gespeichert und validiert, um die besten Netzwerkkonfigurationen zu finden und den Einfluss der Datenpartitionierung zu untersuchen. Die beste Prognoseleistung läßt ein Netz aus Analyseschritt IId erwarten. Es enthält 12 Eingabeknoten und eine verdeckte Zwischenschicht mit 10 verdeckten Neuronen. Der mittlere quadratische Fehler der Validierungsdaten beträgt $0,92 K^2$. Im Folgenden wird detailliert erläutert, welche Auswirkungen die Aufteilung der Teildatensätze und die Netzwerkarchitektur auf das Training haben. Die besten Netze mit unterschiedlichen Eingabevektoren aus den einzelnen Analyseschritten werden vorgestellt und die Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen beschrieben.

6.1.1 Datenpartitionierung

Die verschiedenen Methoden zur Datenpartitionierung wurden mit einem neuronalen Netz mit 13 Eingabeneuronen und einer verdeckten Zwischenschicht mit 6 Neuronen untersucht. Der Eingabevektor entspricht dem aus Analyseschritt IIa (Tab. 5.2). Tabelle 6.1 zeigt die mittleren quadratischen Fehler aus den Validierungen der Netze, die mit den unterschiedlichen Partitionierungen trainiert wurden.

Bei der Verteilung der Muster in den Mengenverhältnissen 29:17:11 (Training:Test:Validierung) mit den *Extremwerten aller Variablen in den Trainingsdaten* wird mit diesem Netzwerk ein mittlerer quadratischer Fehler der Validierungsdaten von $MSE = 0,71 K^2$ erreicht (Tab. 6.1). Erhöht man die Anzahl der Trainingsmuster auf 39 (Verhältnis 39:9:9) steigt der MSE der Validierungsdaten auf $1,82 K^2$. Die Varianzen beider Partitionierungen sind mit

Tabelle 6.1: Fehler der Validierungsdaten der Netze, die mit unterschiedlich partitionierten Daten trainiert wurden (*ex in train*: Extremwerte aller Variablen den Trainingsdaten zugeordnet).

Verhältnis	Verfahren	MSE in K^2	s^2 in K^2	MSE/ s^2
29:17:11	ex in train	0,71	2,00	0,36
39:09:09	ex in train	1,82	1,95	0,93
	zufällig:			
	Part1	3,93	1,87	2,10
	Part2	1,17	3,29	0,36
	Part3	2,26	4,04	0,56
	Part4	5,50	10,12	0,54
	Part8	2,96	4,02	0,74
	Part10	3,44	4,01	0,86

2,00 und 1,95 ähnlich. Setzt man MSE und Varianz s^2 ins Verhältnis, so deutet ein niedriger Wert auf bessere Prognoseleistungen hin. Daher wird sowohl aufgrund des MSE, als auch aus dem Verhältnis $\frac{MSE}{s^2}$ die Partitionierung 27:17:11 besser bewertet als 39:9:9.

Bei einer *rein zufälligen Verteilung* aller Muster deuten die Ergebnisse des Kruskal-Wallis-Tests bereits darauf hin, dass aufgrund der Inhomogenität der Datensätze Schwierigkeiten bei der Prognose entstehen können. Tabelle 6.2 zeigt die p-Werte des Tests von 10 verschiedenen, zufälligen Datenaufteilungen. Sehr geringe p-Werte ($< 0,125$ oder $< 0,05$) bedeuten, dass die Nullhypothese, also die Annahme gleicher Verteilung der Teildatensätze, auf dem Signifikanzniveau $\alpha = 12,5\%$ bzw. $\alpha = 5\%$ verworfen werden muss.

Aufgrund der niedrigen p-Werte einzelner Variablen muss die Nullhypothese für die Partitionierungen 1, 3, 5, 6, 7 und 9 verworfen werden, d. h. es kann nicht davon ausgegangen werden, dass Trainings-, Test- und Validierungsdaten die gleiche Grundgesamtheit repräsentieren. Werden mit solchen Partitionierungen neuronale Netze trainiert, so sind die Fehler der Prognosen sehr hoch (Tab. 6.1). Mit Partitionierung 2 wurde als einziges ein MSE erreicht, der mit den Extremwert-Partitionierungen vergleichbar ist. Auch im Verhältnis zur Varianz wird hier ein guter Wert erreicht. Bei den übrigen Partitionierungen schwanken die Varianzen der Validierungsdaten über einen weiten Bereich. Auf das Training mit den Partitionierungen 5, 6, 7 und 9 wurde verzichtet, weil keine guten Trainingsergebnisse zu erwarten waren.

Tabelle 6.2: p-Werte aus dem Kruskal-Wallis-Test für 10 verschiedene, zufällige Partitionierungen im Mengenverhältnis 39:9:9.

	Part1	Part2	Part3	Part4	Part5	Part6	Part7	Part8	Part9	Part10
WWB	0,567	0,752	0,116	0,552	0,494	0,959	0,385	0,773	0,745	0,925
mQgeo	0,240	0,312	0,366	0,441	0,448	0,238	0,184	0,203	0,471	0,275
Ausl	0,049	0,265	0,652	0,284	0,472	0,191	0,038	0,253	0,113	0,814
JMT	0,880	0,507	0,390	0,709	0,485	0,729	0,484	0,725	0,664	0,482
D	0,337	0,574	0,323	0,357	0,630	0,635	0,029	0,642	0,284	0,917
BT01	0,283	0,503	0,506	0,555	0,109	0,711	0,876	0,720	0,841	0,197
BT04	0,744	0,563	0,101	0,308	0,446	0,042	0,932	0,208	0,652	0,608
BT05	0,251	0,245	0,990	0,635	0,238	0,129	0,711	0,447	0,950	0,176
BT06	0,912	0,312	0,312	0,210	0,953	0,804	0,760	0,157	0,172	0,218
BT07	0,123	0,746	0,705	0,655	0,773	0,137	0,123	0,950	0,435	0,716
BT08	0,466	0,730	0,020	0,864	0,880	0,888	0,526	0,478	0,655	0,881
BT12	0,665	0,709	0,995	0,970	0,948	0,952	0,920	0,651	0,021	0,262
BT13	0,100	0,898	0,927	0,166	0,483	0,146	0,703	0,390	0,157	0,271
NQT	0,203	0,433	0,900	0,331	0,424	0,461	0,073	0,254	0,914	0,892

Orange unterlegt: signifikant auf dem Niveau $\alpha = 5\%$,

Gelb unterlegt: signifikant auf dem Niveau $\alpha = 12,5\%$

Tabelle 6.3: Mittlere Quadratische Fehler (MSE) der besten Netze aus den Hauptanalyseschritten (Architektur 19-14-1 bedeutet: 19 Eingabeneuronen, 14 verdeckte Neuronen, 1 Ausgabeneuron).

Analyseschritt	Architektur	MSE /K ²
I	a	0,71
	b	0,81
II	a	0,71
	b	0,96
	c	1,47
	d	0,92
	e	1,93
III	a	1,21
	b	0,99

Insgesamt ist festzustellen, dass die erzielten Prognoseleistungen sehr stark von der Partitionierung abhängen. Die rein zufällige Partitionierung ist nur bei gewissenhafter Prüfung der Übereinstimmung der Teildatensätze anwendbar. Die besten Ergebnisse liefert die Partitionierung im Verhältnis 29:17:11 mit Verwendung der Extremwerte aller Variablen für das Training.

6.1.2 Eingabemuster

Die jeweils minimalen mittleren quadratischen Fehler der Validierungsdaten bei unterschiedlichen Eingabemustern sind in Tabelle 6.3 aufgeführt. Alle diese Netze wurden mit Daten der gleichen Partitionierung trainiert (29:17:11, Extrema in Training, zufällige Verteilung der übrigen Muster). Die Architektur der Netze wurde hinsichtlich der Anzahl der verdeckten Neuronen variiert und in der Tabelle 6.3 der MSE der jeweils besten Topologie aufgeführt.

Im Allgemeinen werden die besten Ergebnisse erzielt, wenn die Netze eine verdeckte Zwischenschicht besitzen. Die Anzahl der verdeckten Neuronen in dieser Zwischenschicht sollte unter der Anzahl der Eingabeparameter liegen. Mit höheren Anzahlen von hidden-Neuronen oder zwei verdeckten Zwischenschichten wurden in allen Analysen schlechtere Ergebnisse erzielt.

Die Netze des Hauptanalyseschritts I haben relativ geringe Fehler mit $0,71 K^2$ bzw. $0,81 K^2$. Im Schritt II liegen die MSE meist höher, mit Ausnahme von

Netz IIa ($MSE = 0,71 K^2$). Die Netze c und e produzieren sehr große Fehler mit $1,47 K^2$ bzw. $1,93 K^2$. Werden die Gesteinsarten der Sondenbohrung nicht berücksichtigt steigt der Fehler ebenfalls auf $1,21 K^2$ (IIIa) bzw. $0,99 K^2$ (IIIb). Generell sind Netze mit kleineren Eingabemustern zu bevorzugen, da durch die geringere Komplexität die Generalisierungsleistung oft höher und die Anwendung einfacher ist. Auf der Grundlage des MSE ist daher das Netz IIa als das beste zu bewerten.

6.1.3 Sensitivitätsanalysen

Die Sensitivitätsanalysen werden parallel zur Netzwerkoptimierung und zur abschließenden Plausibilitätskontrolle durchgeführt. Im Folgenden werden die Analysen für das beste Netz aus IIa beschrieben. Das Netz besitzt 13 Eingabeneuronen, 6 Neuronen in der verdeckten Zwischenschicht und produziert auf den Validierungsdaten einen MSE von $0,71 K^2$ (Tab. 6.3). Damit stellt es hinsichtlich Netzgröße und MSE der Validierungsdaten das Optimum der Analysen dar. Die Beschreibung der Sensitivitätsanalysen soll unter anderem verdeutlichen, warum dieses neuronale Netz trotzdem nicht für weitere Anwendungen empfohlen werden kann.

Die Art der Warmwasserbereitung beeinflusst die Soletemperatur deutlich (Abb. 6.1, oben links). Zwischen den Variablenwerten 0 und 1 (Warmwasserbereitung vollständig mit anderen Energiequellen oder vollständig mit Wärmepumpe) kann die Soletemperatur um mindestens 1 K steigen.

Die mittlere geothermisch bereitgestellte Wärmemenge pro Jahr mQ_{geo} beeinflusst die Soletemperatur merklich, doch in eher geringem Ausmaß (Abb. 6.1, oben rechts). Steigt die entzogene Wärmemenge, so sinkt die Soletemperatur. Die Stärke des Zusammenhangs ist jedoch eher gering. Am größten ist die Veränderung bei Anlage 1057 mit einem Temperaturunterschied von 0,35 K zwischen 15178 kWh und 28187 kWh geothermischer Energie, was beinahe einer Verdoppelung der entzogenen Wärme entspricht.

Der Auslastungsgrad der Anlage wirkt sich sehr stark auf die Fluidtemperaturen innerhalb der Erdwärmesonde aus. Hohe Auslastungsgrade führen zu niedrigeren Soletemperaturen (Abb. 6.1, Mitte links). Ein Auslastungsgrad von 1 bedeutet, dass die Anlage am Auslegepunkt die maximal mögliche Laufzeit nutzen muss, um ausreichend Wärme zur Verfügung stellen zu können (ERB et al., 2004). Stehen dem Untergrund längere Regenerationszeiten zur Verfü-

6.1 Ergebnisse

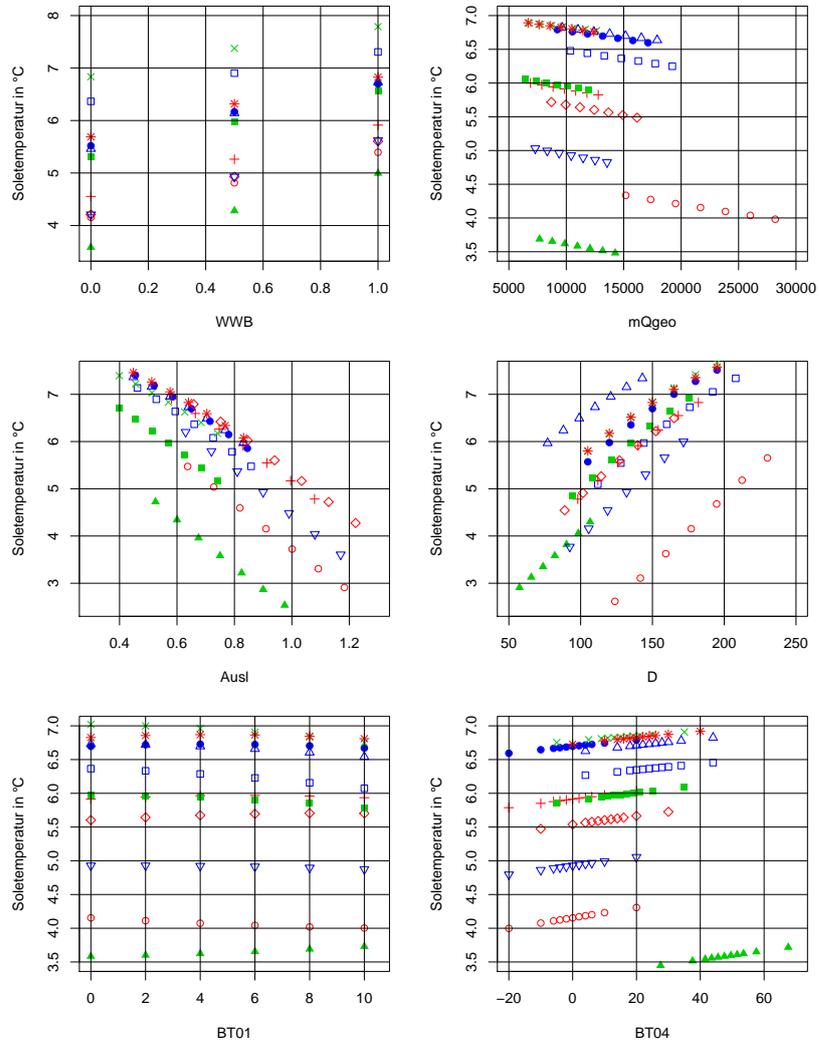


Abbildung 6.1: Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen des besten Netzes aus IIa. Variablen: Warmwasserbereitung, geothermisch bereitgestellte Wärmemenge pro Jahr in kWh, Auslastungsgrad, Endteufe in m, Mächtigkeiten Bodentypen 01 und 04 in m. Legende siehe Abbildung 6.5

gung, so steigt die mittlere Soletemperatur deutlich an.

Die mittlere Soletemperatur korreliert positiv mit der erreichten Endteufe der Erdwärmesonde. Im Mittel liegt die Steigung bei 2,5 K pro 100 m, also im unteren Bereich der durchschnittlichen geothermischen Tiefenstufe, die im Schweizer Mittelland etwa bei 2,5 bis 4 K liegt (ERB et al., 2004).

Bei den Gesteinen ist der Einfluss der Mächtigkeit im Bohrprofil auf die Soletemperatur in Ausmaß und Tendenz unterschiedlich. Bei den Arten BT04 (Kies/ Sand, trocken), BT05(Kies/ Sand wasserführend), BT06 (Ton/ Lehm, feucht) und BT12 (Mergel) steigt die Soletemperatur mit zunehmender erbohrter Mächtigkeit (Abb. 6.1 und 6.2). BT01 (Boden, trocken und locker) wirkt sich bei den verschiedenen Anlagen der Validierungspartition unterschiedlich aus. Bei den übrigen Gesteinen besteht eine negative Korrelation. Bei BT07 (Kalkstein) ist der Betrag der Steigung mit einem Mittelwert von 0,03 K pro m am größten.

Die Abhängigkeiten werden im Allgemeinen durch ein lineares Modell gut abgebildet. Beispielhaft sind die Ergebnisse zweier Anlagen in Abb. 6.3 für BT07 (Kalkstein) dargestellt. In diesen Einzeldarstellungen werden die leichten Abweichungen vom linearen Modell deutlich. Die Plots der Residuen bestätigen diese Abweichung sehr klar. Bei den meisten Gesteinen kann die Abhängigkeit aber linear gut angenähert werden. In Tabelle 6.4 sind die Mittelwerte der Steigungen über alle Validierungs-Anlagen \bar{m} für die einzelnen Gesteinsarten angegeben.

Tabelle 6.4: Mittlere Steigungen \bar{m} der Regressionsgeraden aller Validierungsanlagen für die einzelnen Gesteinsarten in K pro m (s = Standardabweichung).

Gesteinsart	\bar{m}	s
BT01	$1,28 \cdot 10^{-3}$	$3,18 \cdot 10^{-2}$
BT04	$5,68 \cdot 10^{-3}$	$1,13 \cdot 10^{-3}$
BT05	$2,46 \cdot 10^{-2}$	$3,37 \cdot 10^{-3}$
BT06	$2,08 \cdot 10^{-3}$	$2,60 \cdot 10^{-4}$
BT07	$-3,13 \cdot 10^{-2}$	$4,24 \cdot 10^{-3}$
BT08	$-2,50 \cdot 10^{-3}$	$6,17 \cdot 10^{-4}$
BT12	$3,64 \cdot 10^{-3}$	$8,49 \cdot 10^{-4}$
BT13	$-4,44 \cdot 10^{-3}$	$7,89 \cdot 10^{-4}$

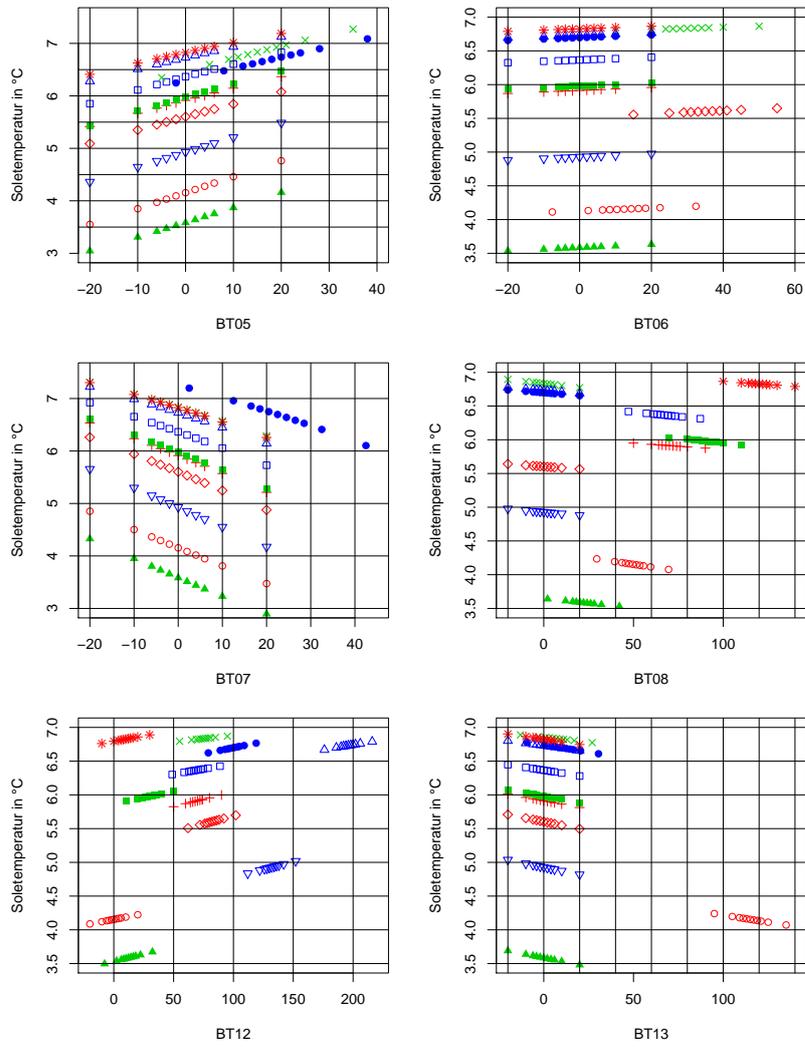


Abbildung 6.2: Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen des besten Netzes aus Ila. Variablen: Mächtigkeiten Bodentypen 05, 06, 07, 08, 12 und 13 in m. Legende siehe Abbildung 6.5.

6 Ergebnisse und Interpretation der KNN-Analysen

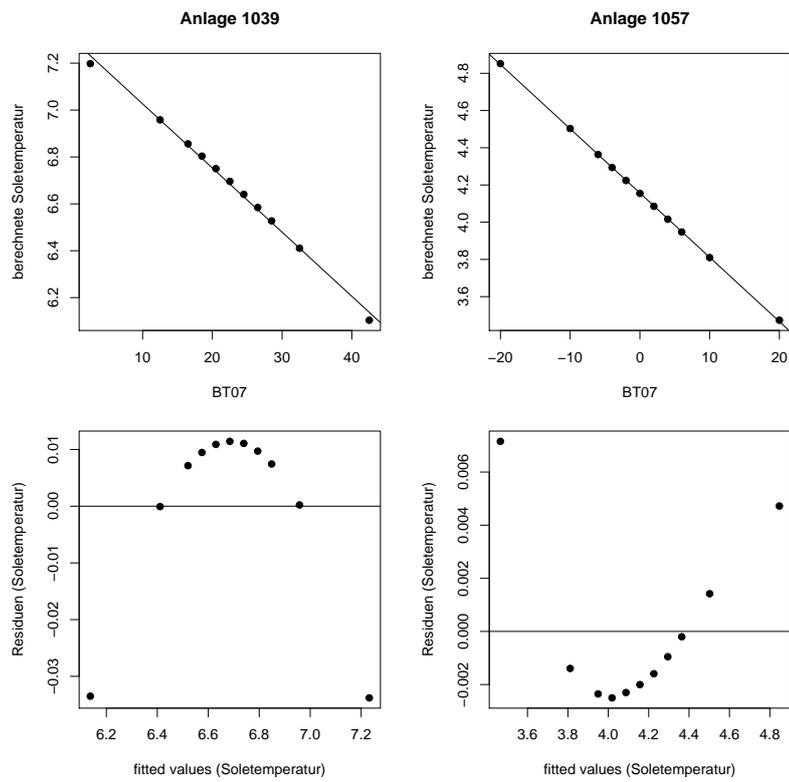


Abbildung 6.3: Sensitivität BT07: Berechnete Soletemperaturen der Anlagen 1039 und 1057 mit Regressionsgeraden (oben) und Plots der Residuen (unten).

Bei BT01 (Boden, trocken und locker) sind die Änderungen der Soletemperatur nur sehr gering, aber die Abweichung vom linearen Modell besonders deutlich. Je nach Anlage variiert die Steigung der Regressionsgeraden sogar in ihrem Vorzeichen (Abb. 6.4). Bei entsprechender Vergrößerung in den jeweiligen Zahlenbereich sowie im Plot der Residuen wird deutlich, dass der Zusammenhang durch ein lineares Modell nur annähernd beschrieben werden kann.

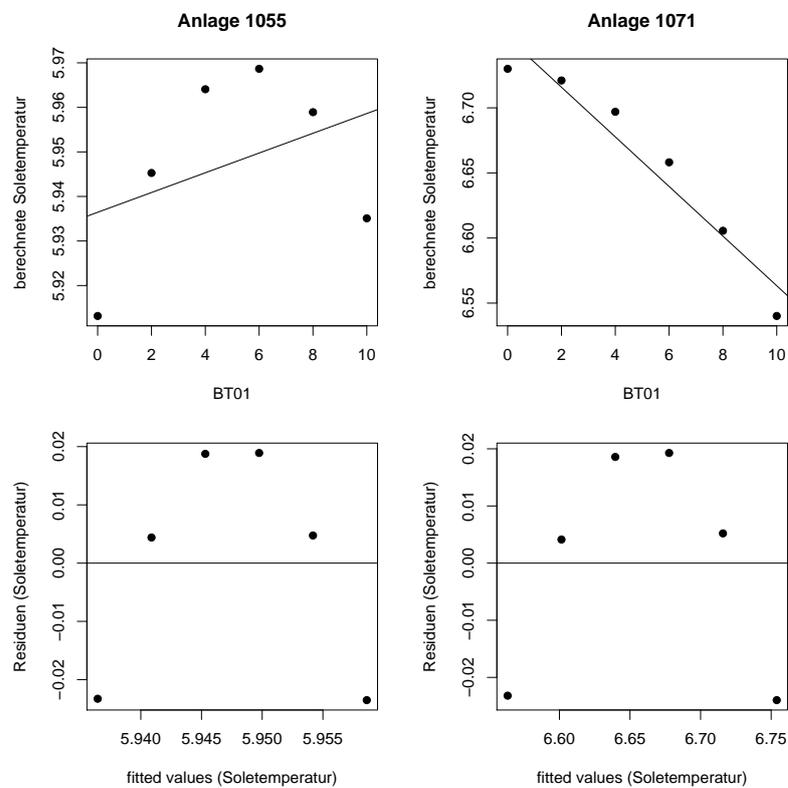


Abbildung 6.4: Sensitivität BT01: Berechnete Soletemperaturen der Anlagen 1055 und 1071 mit Regressionsgeraden (oben) und Plots der Residuen (unten).

6 Ergebnisse und Interpretation der KNN-Analysen

Zwischen der Jahresmitteltemperatur und der berechneten Soletemperatur (Abb. 6.5) besteht ebenfalls eine Abhängigkeit. Die Soletemperatur sinkt mit steigender Jahresmitteltemperatur. Durch die höhere Starttemperatur zu Beginn der Untergrundpassage wäre jedoch ein umgekehrter Zusammenhang zu erwarten.

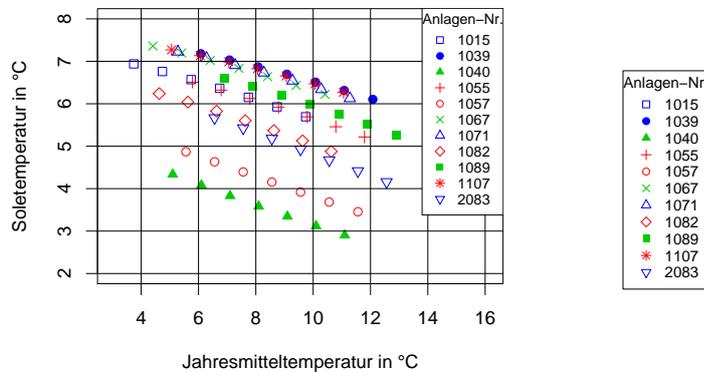


Abbildung 6.5: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse der Jahresmitteltemperatur des besten Netzes aus IIa. Rechts: Legende zu den Abbildungen 6.1, 6.2 und 6.5

6.2 Interpretation der Ergebnisse neuronaler Netze

6.2.1 Datenpartitionierung

Die Untersuchungen zur Datenpartitionierung zeigen, dass eine rein zufällige Unterteilung in Trainings-, Test- und Validierungsdaten im vorliegenden Fall nicht zu empfehlen ist. Die statistische Gleichheit der Teildatensätze kann aufgrund des geringen Umfangs des Gesamtdatensatzes nicht ohne weiteres angenommen werden. Bei rein zufälliger Datenpartitionierung muss mit Hilfe statistischer Tests überprüft werden, ob die Untermengen die gleiche Grundgesamtheit repräsentieren. Wenn diese Bedingung nicht erfüllt ist, sollte ei-

ne neue Partitionierung vorgenommen werden. Im Allgemeinen sind die Trainingsergebnisse der zufälligen Aufteilungen schlechter als bei der Sortierung der Extremwerte aller Variablen in die Trainingsdaten. Diese Ergebnisse stehen im Einklang mit den Empfehlungen von FLOOD & KARTAM (1994) und BOWDEN et al. (2002). Neben der fehlenden statistischen Vergleichbarkeit kann auch das schlechte Extrapolationsverhalten der Netze für die schlechteren Prognoseleistungen verantwortlich gemacht werden. Besonders aufgrund des geringen Umfangs des zur Verfügung stehenden Datensatzes mit insgesamt 57 Mustern, muss die Partitionierung durch die Sortierung der Extremwerte in die Trainingsdaten kontrolliert werden.

Beim Umfang der einzelnen Teildatensätze können die Empfehlungen von BOWDEN et al. (2002) und SHAHIN et al. (2004) bestätigt werden. Wird der Umfang der Trainingsdaten, in erster Linie auf Kosten der Testdaten, erhöht, so verschlechtert sich die Performance der Netze.

Das Training mit verschiedenen Partitionierungen hat gezeigt, dass bei den vorliegenden Daten die erzielten Ergebnisse allgemein sehr stark von der Charakteristik der Trainingsdaten abhängen. Bei inhomogenen Teildatensätzen ist eine schlechte Generalisierungsleistung der trainierten Netze zu erwarten.

6.2.2 Netzwerkarchitektur

Für das vorliegende Problem ist eine verdeckte Zwischenschicht zur Berechnung ausreichend. Die Anzahl der verdeckten Neuronen in dieser Zwischenschicht sollte geringer als die Anzahl an Eingabeneuronen sein. Insgesamt ist eine Verringerung der Freiheitsgrade durch möglichst wenige verdeckte Neuronen anzustreben, damit die Komplexität des Netzwerkes nicht zu groß wird. Diese großen Netze zeigen in der Anwendung schlechtere Generalisierungsleistungen. Die lineare Annäherung durch vollständiges Auslassen der Zwischenschicht produziert Netze mit höheren Fehlern als bei Verwendung einer Zwischenschicht.

6.2.3 Sensitivitätsanalysen

Neben der Auswertung der Fehler der Ausgabe der Netze muss die Plausibilität der Netze unbedingt überprüft werden. Durch Sensitivitätsanalysen wird einerseits deutlich, welche Parameter großen Einfluss auf die Ergebnisgröße

haben und welche vernachlässigbar sind. Andererseits wird mit diesen Analysen aber auch überprüft, ob die Abhängigkeit der Ausgabe von einer Variablen des Eingabevektors plausibel ist. Um diesen Zusammenhang einzuschätzen, ist eine gute Kenntnis des zu analysierenden Systems notwendig.

Die Art der Warmwasserbereitung beeinflusst die Temperatur des Fluids in der Erdwärmesonde deutlich. Für die Warmwasserbereitung werden höhere Temperaturen benötigt als für den Heizungsvorlauf. Daher muss die Wärmepumpe kurzzeitig immer wieder hohe Leistungen bringen und der Untergrund wird vorübergehend stark beansprucht. Dadurch kommt es zu einer stärkeren Abkühlung der nahen Sondenumgebung, die nur bei ausreichenden Regenerationszeiten wieder ausgeglichen werden kann.

Die Sensitivitätsanalysen ergeben, dass sich die geothermisch bereitgestellte Wärmemenge nur in geringem Maße auf die Soletemperatur auswirkt. Die Variation dieses Parameters um $\pm 30\%$ bewirken bei allen Validierungsanlagen einen Temperaturunterschied von $< 0,5\text{ K}$. Hier muss davon ausgegangen werden, dass die neuronalen Netze diesen Einfluss bisher unterbewerten.

Die Berechnungen der Soletemperaturen bei verschiedenen Auslastungsgraden zeigen, wie wichtig Regenerationszeiten für den Untergrund sind. Eine Auslastung von 1 bedeutet, dass die Wärmepumpe bei Temperaturen am Auslegepunkt die höchstmögliche Laufzeit arbeitet. Bei geringeren Auslastungsgraden sind die Ruhephasen der Anlage länger oder häufiger. In diesen Zeiten kann sich der Untergrund thermisch regenerieren, indem Wärme aus der Sondenumgebung nachströmt. Findet diese Wärmenachlieferung rein konduktiv, also ohne Grundwasserfluss statt, so sind Regenerationsphasen um so wichtiger, da der konduktive Wärmetransport im Untergrund im Allgemeinen sehr viel langsamer geschieht als der konvektive. Liegt ein Grundwasserstrom mit ergiebigen Filtergeschwindigkeiten vor, so wird permanent auch konvektiv Wärme an die Sonde herangetragen und die thermische Regeneration kann schneller vor sich gehen. Der Einfluss des Auslastungsgrades sollte bei der Planung außerdem berücksichtigt werden, wenn die Erdwärmesonden nicht auf die maximal notwendige Heizleistung am Auslegepunkt dimensioniert werden, sondern eine bivalente Betriebsweise vorgesehen ist, z.B. der Einbau eines Heizstabes (bivalente, monoenergetische Betriebsweise, nähere Beschreibungen dazu bei KRUSE & HEIDELCK (2002)). In dem Fall wird die Sonde bereits bei Außentemperaturen oberhalb der Temperatur am Auslegepunkt durch hohe Laufzeiten stark belastet. Durch die kurzen oder fehlenden Regenerationszeiten sinkt

dann die Fluidtemperatur in der Sonde.

Nicht nur die erbohrten Gesteine mit ihren wirksamen Mächtigkeiten beeinflussen die mittlere Soletemperatur, sondern auch die Endteufe der Sondenbohrungen. Vor diesem Hintergrund müssen herkömmliche Vorgehensweisen, die zur Sondendimensionierung lediglich die Gesteinsart, nicht aber die Endteufe berücksichtigen, hinterfragt werden. Die in der VDI-Richtlinie 4640, Blatt 2 gegebenen Richtwerte für spezifische Entzugsleistungen verschiedener Gesteine (in $\frac{W}{m}$) können beispielsweise zur Auslegung einer Erdwärmesonde verwendet werden. Dieses Verfahren ist lediglich auf die Bewertung bis maximal 100 m Tiefe beschränkt. Die tatsächliche Endteufe der Bohrung wird jedoch nicht weiter berücksichtigt.

Die Sensitivitätsanalysen zeigen, dass die Abhängigkeiten zwischen Eingabe- und Ergebnisgröße nicht vollständig linear sind. In den meisten Fällen kann der Zusammenhang durch eine lineare Korrelation aber gut angenähert werden. Ohne verdeckte Zwischenschicht steigt der MSE der Validierungsdaten trotz allem an, so dass insgesamt die Nichtlinearität nicht vernachlässigt werden sollte.

Besonders der Einfluss der Jahresmitteltemperatur auf die Soletemperatur zeigt, dass die Prognoseleistung der Netze nicht allein durch den MSE der Validierungsdaten bewertet werden darf. Neben dem Fehler der Ausgabe muss überprüft werden, ob die gefundenen Abhängigkeiten plausibel sind. Hierzu ist entsprechendes Expertenwissen unentbehrlich. Weil der abgeleitete Einfluss der Jahresmitteltemperatur nicht plausibel ist, muss dieser Parameter aus dem Eingabevektor entfernt werden. Die mäßige Zunahme des MSE muss in dem Fall in Kauf genommen werden. Für weitere Untersuchungen würde daher das neuronale Netz aus IId mit zwölf Größen im Eingabevektor empfohlen.

Die Korrelation zwischen der geothermisch bereitgestellten Wärme mQ_{geo} und der Soletemperatur kann mit den vorliegenden Daten nicht besser herausgearbeitet werden. Die Tendenz der Beziehung ist plausibel, die Stärke des Zusammenhangs jedoch zu gering. Zur Überprüfung und Verbesserung dieser Abhängigkeit ist eine breitere Datengrundlage erforderlich.

6.2.4 Bestes neuronales Netz: a900 aus Analyseschritt IId

Aufgrund der MSE der trainierten Netze und der Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen wird das beste Netzwerk aus dem Analyseschritt IId als Optimum des

6 Ergebnisse und Interpretation der KNN-Analysen

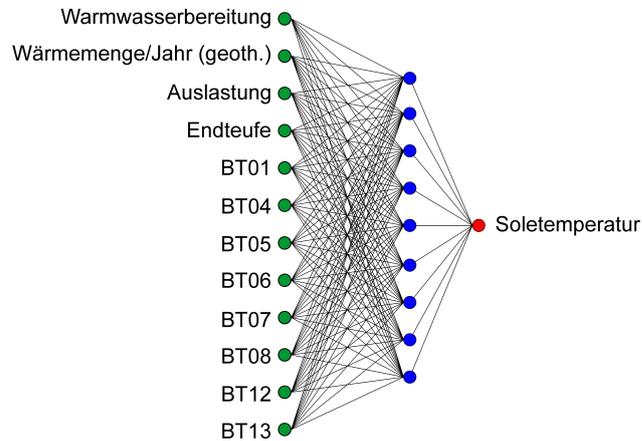


Abbildung 6.6: Schematische Darstellung des Netzes a900 aus Analyseschritt II.

Trainings herausgestellt. Es besitzt zwölf Neuronen in der Eingabeschicht und neun in der verdeckten Zwischenschicht (Abb. 6.6). Die Eingabegrößen sind:

- Art der Warmwasserbereitung,
- geothermisch bereitgestellte Wärme pro Jahr,
- Auslastungsgrad,
- Endteufe der Erdwärmesonde(n),
- wirksame Mächtigkeiten der erbohrten Gesteine.

Das Netz wurde mit Backpropagation über 900 Zyklen mit der Partitionierung 29:17:11 (Extremwerte in Trainingspartition) trainiert. Auf die Validierungsdaten produziert es einen MSE von $0,92 \text{ K}^2$. In Abb. 6.7 sind die berechneten Soletemperaturen der Validierungsdaten gegen die gemessenen Werte aufgetragen. Die Regressionsgerade durch die Punkte wird beschrieben durch:

$$\begin{aligned}b &= 0,5^\circ\text{C} \\m &= 0,9 \\r &= 0,71\end{aligned}$$

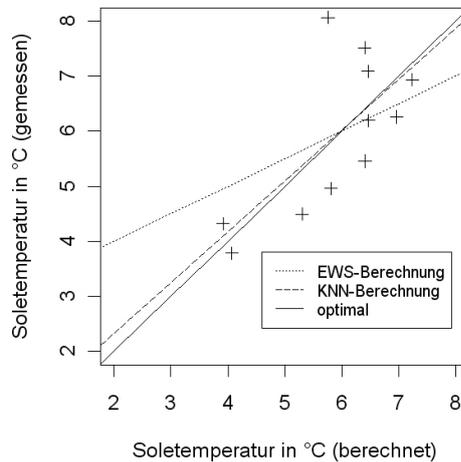


Abbildung 6.7: Plot der berechneten über den gemessenen Soletemperaturen. Dargestellt sind die mit KNN berechneten Werte als Punkte und die Regressionsgeraden für die KNN- und die EWS Berechnung (letztere von ERB et al. (2004)). Die durchgezogene Gerade repräsentiert das theoretische Optimum mit $m = 1$ und $b = 0^\circ\text{C}$. (RÜSGEN & CZURDA, 2006)

Es ist anzunehmen, dass es sich bei den zwei Anlagen mit den höchsten gemessenen Temperaturen um Ausreißer handelt. Bei einer der zwei Anlagen konnte diese Vermutung belegt werden, da neben dem Untergrund eine zweite Wärmequelle (Abluft) genutzt wird. Dadurch ist die gemessene Temperatur höher als die berechnete (RÜSGEN & CZURDA, 2006).

ERB et al. (2004) haben in der FAWA-Studie für alle erhobenen Anlagen Vergleichsrechnungen mit dem Auslegungsprogramm EWS durchgeführt und die berechneten Soletemperaturen ebenfalls den gemessenen gegenübergestellt. Die Autoren beschreiben den Zusammenhang mit:

$$\begin{aligned} b &= 3^\circ\text{C} \\ m &= 0,5 \\ r &= 0,62 \end{aligned}$$

Diese Regressionsgerade ist in Abb. 6.7 gepunktet dargestellt. Im Vergleich wird deutlich, dass das neuronale Netz auf den Validierungsdaten die Soletemperatur besser abbilden kann, als das Programm EWS für alle Anlagen.

7 Diskussion und Ausblick

7.1 Leitfaden und Richtlinien

Um die Anlagensicherheit von Erdwärmesondenheizungen auf lange Sicht zu gewährleisten, ist eine gewissenhafte Planung, Bauausführung und Protokollierung unbedingt notwendig. Dazu sind klare, verbindliche Vorgaben unumgänglich. Eine verlässliche Qualitätskontrolle ist nur möglich, wenn jeder Ausbau angemessen dokumentiert wird.

Es ist zu empfehlen, verschiedene Vorgaben übersichtlicher zu gestalten und darzustellen. Im Jahr 2004 verteilten sich die Regelungen allein in Baden Württemberg über drei Schriften. Verschiedene Punkte überschneiden sich, andere finden keine Erwähnung. Im Jahr 2005 erschien der überarbeitete Leitfaden Erdwärmesonden, der einige Sachverhalte klarer zusammenfasst. Darüber hinaus arbeiten jedoch weiterhin verschiedene Verbände und Arbeitskreise an eigenen Empfehlungen oder Richtlinien für den Bau von Erdwärmesonden. So befindet sich die VDI-Richtlinie 4640 derzeit in Überarbeitung, während für das laufende Jahr 2007 der Gründruck einer neuen DIN zum Bau von Erdwärmesonden angekündigt ist. Die Arbeitskreise der Fachsektion Hydrogeologie der Deutschen Geologischen Gesellschaft (FH-DGG) und der Fachsektion Ingenieurgeologie der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik (FI-DGGT) entwerfen aktuell einen gemeinsamen Leitfaden. Der Verband Beratender Ingenieure (VBI) arbeitet ebenfalls an einer eigenen Handlungsempfehlung. Die Vollständigkeit und Übersichtlichkeit aller Vorgaben und Empfehlungen in einem Schriftstück ist jedoch unbedingt anzustreben, um die Umsetzung zu erleichtern. Es ist zu hoffen, dass durch die neue DIN ein umfassender, bundesweiter und verbindlicher Standard geschaffen wird.

Die Kontrolle der Umsetzung gestaltet sich letztendlich schwierig, da es hierfür keine Zuständigkeit gibt. Im Nachhinein sind viele Sachverhalte nur noch schwer oder nicht mehr nachvollziehbar. Die dargestellten Mängel zeigen die Dringlichkeit der Qualitätsüberwachung auf. Zur Entwicklung erfolgreicher

Standards ist außerdem die Zusammenarbeit aller beteiligten Stellen (Planer, Bohrunternehmer, Ämter, Verbände, Wissenschaftler) wünschenswert, um für alle praktikierbare Lösungen zu finden. Ein erster Schritt zu verbesserten Qualitätssicherung ist das vom Bundesverband Wärmepumpe eingeführte Gütesiegel für Erdwärmesondenbohrfirmen.

Abgesehen von der Einhaltung einzelner, in Richtlinien vorgeschriebener Kriterien, die lediglich das Grundmaß an Anlagensicherheit gewährleisten sollen, ist die Planung von erdgekoppelten Wärmepumpenanlagen mit Erdwärmesonden eine komplexe Aufgabe, die unbedingt durch einen Fachplaner zu erledigen ist. Beispielsweise, neben der Vorgabe, dass der Verpressquerschnitt $> 65\%$ des Bohrlochquerschnitts sein sollte, gilt es bei der Wahl von Bohrl Lochdurchmesser und Sondenrohren zu bedenken, dass sich diese Maße auf verschiedene Leistungsmerkmale auswirken. Werden sehr große Durchmesser gebohrt, so erhöht sich dadurch der Bohrlochwiderstand, was letztendlich zu einem verschlechterten Wärmeentzug führen kann. Die Wahl der Rohrdurchmesser sollte unbedingt von der Tiefe der Sonde abhängig gemacht werden. Kleinere Durchmesser sind für tiefere Sonden nicht geeignet, da große Reibungsverluste entstehen. Diese führen dazu, dass die erforderliche Leistung der Umwälzpumpe des Solekreislaufs steigt, was den Gesamtstromverbrauch erhöht. Es kann also keine generelle Empfehlung zu großen Bohrdurchmessern und kleinen Sondenrohrdurchmessern gegeben werden. Solche Entscheidungen müssen im Einzelfall auf der Grundlage von Sachverständnis und Erfahrung vom Fachplaner getroffen werden.

Abgesehen von der Auslegung der einzelnen Anlagenteile (Wärmequelle, Wärmepumpe, Wärmeverteiler) muss außerdem die gute Abstimmung der Komponenten aufeinander sichergestellt sein.

7.2 KNN-Modell: Genauigkeit und Übertragbarkeit

7.2.1 Modellgenauigkeit

Die berechneten Soletemperaturen der Validierungsdaten weisen geringe mittlere quadratische Fehler auf. Auch die Korrelation zwischen berechneten und gemessenen Werten ist sehr gut. Für diese Anlagen ist mit dem entwickelten Modell eine Prognosegenauigkeit zu erreichen, die über der herkömmlicher Planungstools liegt.

Die Untersuchungen zum Einfluss verschiedener Partitionierungs-Methoden machen deutlich, dass die Prognoseleistung aber noch stark von der Charakteristik der Trainingsdaten abhängt. Aufgrund des relativ geringen Umfangs der Daten kann daher nicht davon ausgegangen werden, dass die trainierten Zusammenhänge für breite Anwendungen bereits genutzt und auf beliebige Standorte übertragen werden können. Für zuverlässige Prognosen muss die Menge und Variabilität der Trainings- und Testdaten erhöht werden. Nur so kann eine gute Übertragbarkeit gewährleistet werden. Die Charakteristik der Daten muss eine höhere Allgemeingültigkeit besitzen. Aufgrund dieser Allgemeingültigkeit muss die Abhängigkeit der Prognoseleistung von der Auswahl der Trainingsmuster vernachlässigbar sein. Mit den vorliegenden Daten ist das bisher nicht möglich.

Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen zeigen, dass gewisse Zusammenhänge zwischen Eingabe und Ausgabe zwar qualitativ richtig erkannt werden, die Stärke der Abhängigkeit scheint aber noch unterbewertet. Besonders der Einfluss der geothermisch bereitgestellten Wärme mQ_{geo} scheint im aktuellen Modell nicht ausreichend einzugehen. Der Einfluss der Jahresmitteltemperatur auf die Effizienz der Erdwärmesonde wird bisher im Allgemeinen als wesentlich angesehen. Die Tatsache, dass die Prognoseleistung der neuronalen Netze ohne Berücksichtigung der Jahresmitteltemperatur jedoch nur in sehr geringem Maße abnimmt, stellt die bisherige Annahme in Frage. Die Jahresmitteltemperatur beeinflusst einerseits den Wärmebedarf, andererseits die oberflächennahe Untergrundtemperatur. Der Wärmebedarf wird im Modell durch die geothermische Wärme mQ_{geo} berücksichtigt. Es ist davon auszugehen, dass die oberflächennahe Untergrundtemperatur an Einfluss gewinnt, je mehr Sonden für eine Anlage gebohrt werden, bzw. je kürzer die Sonden sind, da dadurch verstärkt der oberflächennahe Untergrund genutzt wird. Da in der Schweiz jedoch eher weniger und tiefere Sonden gebohrt werden, ist denkbar, dass die oberflächennahe Untergrundtemperatur und damit die Jahresmitteltemperatur die Sondenleistung eher weniger beeinflussen.

7.2.2 Allgemeine Übertragbarkeit

Zur Anwendung trainierter neuronaler Netze zur Planung neuer Anlagen muss sicher gestellt sein, dass die Charakteristik der neuen Anlage mit der der Trainingsmuster vergleichbar ist. Das heißt einerseits, dass Größen, die im Eingabevektor vorkommen nur in den Intervallen liegen sollten, die von den Trai-

ningsdaten abgedeckt wurden oder die Maximalwerte nur wenig über- bzw. unterschritten werden dürfen. Anderenfalls sind die Netze zur starken Extrapolation gezwungen, womit die Verlässlichkeit des Ergebnisses in Frage zu stellen ist. Andererseits müssen die Anlageneigenschaften, die nicht in das Netz mit eingegeben werden (z.B. Sondenrohrdurchmesser, Hinterfüllmaterial, Frostschutz), Werte besitzen, die von den Trainingsdaten abgedeckt wurden. Werden diese Grundvoraussetzungen so verändert, dass davon ein wesentlicher Einfluss auf den Wärmeentzug der Sonde zu erwarten ist, so kann dieses Verhalten von den neuronalen Netzen nicht bewertet werden.

7.2.3 Regionale Übertragbarkeit

Die meisten Anlagen der FAWA-Studie liegen, bedingt durch die Besiedlungsstruktur der Schweiz, im Schweizer Mittelland. Zur Validierung des Modells liegen leider keine vergleichbaren Daten aus anderen Regionen außerhalb der Schweiz vor. Es können jedoch allgemeine Richtlinien zur Anwendung der Netze gegeben werden. Diese stützen sich einerseits auf die Kenntnis der Anlagencharakteristiken in Baden-Württemberg und der Schweiz (vgl. Abschnitt 3.4), andererseits auf die regionalen geologischen Verhältnisse in den Vergleichsregionen (vgl. Abschnitt 4).

Sollen die Netze auf Anlagen in Baden-Württemberg übertragen werden, so muss sichergestellt sein, dass die Rahmenbedingungen vergleichbar sind. Hinsichtlich des Ausbaus hat der Vergleich von schweizer und deutschen Anlagen gezeigt, dass in weiten Bereichen ähnliche Voraussetzungen angenommen werden können. Eine bis vier Sonden können berücksichtigt werden, nur die Berechnung von Anlagen mit mehr als vier Sonden überschreitet den Bereich des Trainings. Im Falle der Tiefe und der Gesamtsondenmeter sind mit den schweizer Daten lediglich die niedrigsten Wertebereiche nicht abgedeckt, ansonsten ist das Gesamtspektrum vergleichbar. Bei den Sondenrohrdurchmessern müsste die Übertragbarkeit auf 25 mm überprüft werden. Auch in Deutschland sind diese geringen Durchmesser aber die Ausnahme, so dass die überwiegende Zahl der Fälle berücksichtigt werden kann. Ebenso können nur Sonden mit Zement-Bentonit-Hinterfüllung berechnet werden, was aber auch in Deutschland die vorherrschende Hinterfüllmasse ist. Hinsichtlich des Frostschutzes stimmen sowohl verwendete Frostschutzmittel, als auch deren Konzentrationen überein, so dass keine Probleme zu erwarten sind. Die schweizer Trainingsdaten liegen insgesamt geografisch höher als die in Baden-Württemberg

betrachteten Anlagen, decken aber ein größeres Gesamtintervall ab. Bezogen auf ganz Baden-Württemberg stellt die obere Grenze des Spektrums kein Problem dar, da im gesamten Bundesland keine Höhen > 1600 m ü NN (Maximum der FAWA-Daten) vorkommen. Es muss jedoch diskutiert werden, in welcher Form sich die Höhenlage tatsächlich auf den Anlagenbetrieb auswirkt. Die betroffene Randbedingung wird letztendlich die Jahresmitteltemperatur sein, die im Allgemeinen mit zunehmender Höhe abnimmt. Für die tieferen Lagen von Baden-Württemberg, die noch dazu durch ihre Lage im Oberrheingraben klimatisch milde Bedingungen vorweisen, muss daher überprüft werden, ob der Einfluss der Jahresmitteltemperatur auch über diese erweiterte Spanne vernachlässigbar ist.

Die Art der Eingabe der Gesteine begrenzt die regionale Übertragbarkeit des Modells, da der Untergrund nominal (lithologisch) charakterisiert werden muss und diese Lithologie mit der Mächtigkeit gewichtet wird. Ein ähnliches Vorgehen erfordert auch die Anwendung der tabellierten spezifischen Entzugsleistungen der VDI-Richtlinie (VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE, 2001). Dabei wird vorausgesetzt, dass die Gesteinsbezeichnungen ähnliche Zusammensetzungen mit vergleichbaren thermischen Eigenschaften umfassen. Je größer die regionalen Unterschiede in der lithologischen Ausprägung sind, um so kritischer muss die Übertragbarkeit hinterfragt werden. Eine andere Möglichkeit wäre die Charakterisierung der Gesteine über bestimmte Materialeigenschaften, wie Wärmeleitfähigkeit, Wärmekapazität, k_f -Wert oder Filtergeschwindigkeit. Hierdurch wird jedoch ein zusätzlicher Interpretationsschritt und aufwändigere Planung notwendig. Gerade für Kleinanlagen liegen für diese Eigenschaften keine belastbaren regionalen Werte vor, so dass auf Literatur- und Schätzwerte zurückgegriffen werden muss. Werden neuronale Netze dagegen auf die in dieser Arbeit beschriebene Art und Weise mit regionalen Daten trainiert, hat dies den Vorteil, dass sie die Eignung der regionalen Ausprägung selbst anhand der realen Zusammenhänge erlernen.

Schwarzwald

Im Schwarzwald steht vielerorts kristallines Grundgebirge an, so dass eine Anwendung des vorgestellten Modells nicht möglich ist. Weil diese Gesteine (Gneise, Granite) in den Ausgangsdaten unterrepräsentiert waren, konnten sie nicht weiter einbezogen werden und es sind keine Eingabeknoten für diese Lithologien enthalten. Im Norden des Schwarzwaldes, wo das Grundgebir-

ge von Buntsandstein und mesozoischen Sedimenten überdeckt wird, ist eine Anwendung prinzipiell möglich, solange keine großen Mächtigkeiten des Grundgebirges erbohrt werden. Die meisten Gesteine des Buntsandstein müssen dann als BT08, Sandstein eingeordnet werden. Es ist anzunehmen, dass in den schweizer Daten vor allem tertiäre Sandsteine innerhalb der Molasse erbohrt wurden. Diese unterscheiden sich von den Sandsteinen des Schwarzwaldes nicht nur durch ihr Alter, sondern auch durch den Ablagerungsraum. Die Sandsteine der Molasse wurden unter marinen Bedingungen abgelagert, die des Buntsandsteins eher unter festländischen und ariden Verhältnissen. Messungen von BLOCH (2006) an Handstücken aus dem Buntsandstein in der Gegend von Neuweiler im Landkreis Calw haben gezeigt, dass die Wärmeleitfähigkeiten eher im unteren Bereich der VDI-Angaben für Sandsteine und nahe am empfohlenen Rechenwert von $2,3 \frac{W}{m \cdot K}$ (VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE, 2000) liegen. Gleiches gilt für den Muschelkalk. Daher ist es durchaus möglich, dass das Modell auf die Sandsteine und Kalke des Schwarzwaldes übertragbar ist.

Die Konglomerate des Buntsandstein können beim erarbeiteten Modell als BT13, als Nagelfluh klassifiziert werden, obwohl es sich bei der Bezeichnung „Nagelfluh“ um eine regionale Bezeichnung aus dem Alpenvorland handelt. Lithologisch ist der Nagelfluh als Konglomerat einzuordnen. Aufgrund der großen Variationsbreite an Geröllspektren und Bindemittel der schweizer Nagelfluh ist eine gute Übertragbarkeit auf andere Konglomerate zu erwarten.

Oberheingraben

Im Oberheingraben erfassen Erdwärmesonden ausschließlich tertiäre und quartäre Gesteine und Lockersedimente. Diese sind mit denen des schweizer Mittellandes gut vergleichbar. Im oberen Tertiär bestand ein gemeinsamer mariner Ablagerungsraum, in dem ähnliche Sedimente entstanden. Im Quartär werden beide Bereiche mit dem Abtragungsmaterial der Alpen und großen Schmelzwassermengen versorgt. Daher ist zu erwarten, dass im Oberheingraben die Gesteine durch die Variablen BT04, BT05, BT06, BT07 und BT08 gut repräsentiert werden können. In Tab. 7.1 wird gezeigt, wie die Gesteine des Oberheingrabens in die Klassifikation der neuronalen Netze eingeordnet werden können. Eine ähnliche Klassifikation wird auch von ONDREKA (2004) im Rahmen einer VDI 4640-basierten Potentialstudie im Ortenaukreis beschrieben.

7 Diskussion und Ausblick

Tabelle 7.1: Mögliche Zuordnung der Gesteine des Oberrheingrabens und der Grabenschultern (Kristallin ausgenommen) in die Klassifikation der neuronalen Netze.

Kürzel	litholog. Beschreibung	Gesteine des Oberrheingrabens
BT04	Kies/Sand, trocken	quartäre Kiese oberhalb des Grundwasserspiegels
BT05	Kies/Sand, wasserführend	wassererfüllte Kiese des Quartär und Jungtertiär
BT06	Ton/Lehm, feucht	tonig-siltige Zwischenhorizonte im Quartär
BT07	Kalkstein	tertiäre Kalksteine im Grabenrandbereich
BT08	Sandstein	tertiäre Sandsteine im Grabenrandbereich

Zur Validierung und Überprüfung der allgemeinen und regionalen Übertragbarkeit sind jedoch systematische Messdaten aus Vergleichsanlagen notwendig. Aufgrund der derzeit anlaufenden Messvorhaben verschiedener Stellen (vgl. Abschnitt 3.1) zur Erhebung solcher Daten werden Übertragbarkeitsstudien unter Umständen in Zukunft möglich. Durch eine breitere Datengrundlage ist grundsätzlich eine Verbesserung und Absicherung des Modells möglich.

7.3 Anwendung neuronaler Netze in einem Planungstool

Um die neuronalen Netze, wie sie hier vorgestellt wurden, in einem Planungstool zu nutzen, müssten diese in eine entsprechende Software-Anwendung integriert werden. Denkbar ist eine Verknüpfung mit einem Algorithmus, der iterativ die optimalen Sondenlängen berechnet. Vorzugeben sind die notwendigen Eingabegrößen der Warmwasserbereitung, geothermisch bereitzustellende Wärme und angestrebter Auslastungsgrad am Auslegepunkt. Zusätzlich muss das zu erwartende Bohrprofil bis zur maximal erschließbaren Tiefe angegeben werden. Daraus würden durch Variation der Endteufe der Sondenbohrung und damit der wirksamen Gesamtmächtigkeiten berechnet, ab welcher Tiefe die normierte Soletemperatur einen vorgegebenen Minimalwert nicht unterschreitet.

In einer dynamischen Anwendung könnten durch fortlaufende Dateneingabe aus neu in Betrieb gegangenen Anlagen das Netz permanent weitertrainiert und dadurch die Prognosen präzisiert werden.

7.4 Potential neuronaler Netze für die oberflächennahe Geothermie

Das Potential neuronaler Netze für die oberflächennahe Geothermie ist grundsätzlich als hoch einzuschätzen. Trotz eines relativ geringen Datenumfanges können bereits gute Prognoseleistungen erzielt werden. Die Ergebnisse sind derzeit noch stark von der Charakteristik der Trainingsdaten abhängig, aber gemessen an der Breite der Datengrundlage bereits sehr gut. Wenn innerhalb der nächsten Jahre vermehrt Daten erhoben und zur Verfügung gestellt werden, können die Methoden der Neuronalen Netze große Fortschritte für die Planung von Erdwärmesonden bringen.

In der vorliegenden Arbeit wurde nur eine einzige denkbare Konfiguration zur Berechnung der normierten Soletemperatur erprobt. Es sind vielfältige weitere Anwendungen möglich (WOERNLE & CZURDA, 2007). Mit neuronalen Netzen mit Rückkopplung zwischen Ausgabe und Eingabe können zeitabhängige Entwicklungen modelliert werden, zum Beispiel der lastabhängige Temperaturverlauf im Sondenfluid oder Temperaturveränderungen in der Sondenumgebung. Denkbar sind auch sehr umfassende Expertensysteme zur allgemeinen Standortbewertung, in denen Genehmigungsfragen und technische Kriterien (z.B. Bohrrisiko) mit berücksichtigt werden. Abgesehen von der Wärmequelleseite können künstliche neuronale Netze auch heizungsseitig zur Steuerung und Regelung oder zur Störungsbewältigung eingesetzt werden.

Darüber hinaus sind allgemeinere Anwendungen möglich, von denen auch die oberflächennahe Geothermie profitieren kann. GANGOPADHYAY et al. (1999) und KUMAR et al. (2002) beschreiben die erfolgreiche Anwendung künstlicher neuronaler Netze zur Untergrundmodellierung. Verlässliche Untergrundmodelle bieten für die oberflächennahe Geothermie einen großen Zugewinn an Planungssicherheit, weil das zu erwartende Bohrprofil sicherer prognostiziert werden kann.

8 Zusammenfassung

Bei der Planung privater Kleinanlagen zur Nutzung der oberflächennahen Geothermie mit Erdwärmesonden müssen in der Regel Sicherheitszuschläge und geringere Planungssicherheit in Kauf genommen werden, da detaillierte Voruntersuchungen den Planungsaufwand in nicht zumutbarem Maße erhöhen. Mit der vorliegenden Arbeit wurde ein alternativer methodischer Ansatz vorgestellt, um auch mit geringem Planungsaufwand präzisere Vorhersagen leistungsrelevanter Parameter als bisher zu ermöglichen. Dazu wurden künstliche neuronale Netze an Daten bestehender Erdwärmesondenanlagen trainiert, um die normierte Soletemperatur im Rücklauf der Erdwärmesonden zu prognostizieren.

Das überwachte Lernen künstlicher neuronaler Netze erfordert eine systematische und repräsentative Datengrundlage. In Deutschland liegen auf den Umweltämtern und Geologischen Diensten verschiedene Informationen über bestehende Erdwärmesondenanlagen vor. Für Art und Umfang der Dokumentation gibt es verschiedene Leitfäden und Richtlinien. Eine Untersuchung der Unterlagen von vier Umweltämtern aus den Jahren 2002 bis 2004 hat gezeigt, dass die Dokumentation in vielen Fällen nicht gemäß der Vorschriften durchgeführt wird. Zur Verbesserung dieser Situation wird empfohlen, eine bundesweite Vereinheitlichung und bessere Übersichtlichkeit der verschiedenen Regelwerke und Empfehlungen zu erarbeiten. Für die Anwendung zum Training der neuronalen Netze können die erhobenen Daten der Umweltämter nicht verwendet werden, da keine Rückmeldungen über den alltäglichen Betrieb der Anlagen vorliegen. Die Effizienz kann daher nicht bewertet werden.

Einzig in der Schweiz wurde bisher systematisch eine größere Zahl von Anlagen erhoben, mit denen die Methode der neuronalen Netze anwendbar ist. In der „Feldanalyse von Wärmepumpenanlagen FAWA 1996-2003“ wurden Kleinanlagen mit Wärmepumpen bis 20 kW über mehrere Jahre vermessen. Die Daten der Anlagen mit Erdwärmesonden wurden vom Bundesamt für Energie zur Verfügung gestellt.

Zum Training der neuronalen Netze wurden verschiedene Lernverfahren, Partitionierungsansätze, Eingabemuster und Netzwerkarchitekturen erprobt. Es konnten so Netze entwickelt werden, die auf eine Menge von 11 Validierungsanlagen eine sehr gute Prognoseleistung zeigen. Verglichen mit herkömmlichen Auslegungstools ist eine erhöhte Präzision zu erwarten. Die Prognoseleistung der Netze ist aufgrund des Datenumfangs noch von der Art der Datenpartitionierung beeinflusst.

In den Sensitivitätsanalysen konnte gezeigt werden, dass die Auslastung bei Auslegebedingungen einen großen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit der Sonde hat. Durch größere Regenerationszeiten für die Sondenumgebung kann die Effizienz erhöht werden. Die Jahresmitteltemperatur und damit die oberflächennahe Untergrundtemperatur haben gemäß der Sensitivitätsanalysen keinen großen Einfluss auf den potentiellen Wärmeentzug. Der Einfluss der mittleren geothermisch bereitgestellten Wärme pro Jahr auf die normierte Soletemperatur ist bei den erarbeiteten Neuronalen Netzen eher gering. Es wird davon ausgegangen, dass dieser im Modell bisher unterschätzt wird. Um die Verlässlichkeit dieser gefundenen Zusammenhänge zu erhöhen ist eine breitere Datengrundlage unabdingbar.

Die regionale Übertragbarkeit konnte mangels entsprechender Datengrundlagen nicht an einzelnen Validierungsanlagen im Bereich der Vergleichsregionen Schwarzwald und Oberrheingraben durchgeführt werden. Aufgrund der Ähnlichkeiten im Anlagenausbau und der Kenntnis der regionalen Geologie kann diese nur allgemein diskutiert werden. Da sich die wesentlichen Merkmale des Ausbaus in Deutschland und der Schweiz nicht stark unterscheiden, kann diesbezüglich von einer guten Übertragbarkeit ausgegangen werden. Für den Schwarzwald muss die Modellanwendung stark eingeschränkt werden, weil weite Bereiche des Schwarzwaldes vom kristallinen Grundgebirge dominiert werden, das im Training der neuronalen Netze nicht berücksichtigt werden konnte. Nur im Norden des Schwarzwaldes, wo mesozoische Sedimente das Grundgebirge bedecken, ist eine Anwendung der neuronalen Netze möglich. Im Oberrheingraben dagegen ist zu erwarten, dass die erbohrten Lithologien mit denen des schweizer Datensatzes große Ähnlichkeit haben. Diese Vergleichsregion lässt eine gute Modellübertragbarkeit erwarten.

Im Allgemeinen ist das Potential der Methoden der neuronalen Netze für die oberflächennahe Geothermie groß. Trotz eher geringen Umfangs der Datengrundlage zum Training konnten bereits sehr gute Prognoseleistungen erzielt

8 Zusammenfassung

werden. Mit dem Training in anderen Konfigurationen, Architekturen und mit anderen Zielparametern sind weitere vielversprechende Anwendungen denkbar.

Literaturverzeichnis

- AMARI, S. (1997): Asymptotic Statistical Theory of Overtraining and Cross-Validation. *IEEE Transactions on Neural Networks*, **8**: 985–996; New York.
- BISHOP, C. M. (2000): *Neural Networks for Pattern Recognition*. 482 S.; Oxford: Oxford University Press - ISBN 0-19-853864-2.
- BLOCH, T. (2006): GIS-gestützte Potenzialanalyse und Erstellung einer Potenzialkarte für die oberflächennahe Geothermie im Raum Neuweiler im Nordschwarzwald. Diplomarbeit (unveröff.), 93 S., 49 Abb., 6 Tab.; Universität Karlsruhe (TH).
- BOWDEN, G. J., MAIER, H. R. & DANDY, G. C. (2002): Optimal division of data for neural network models in water resources applications. *Water Resources Research*, **38**, 2: 1–11; Washington, D.C.
- BUNDESVERBAND WÄRMEPUMPE (BWP) (2003): Leitfaden Erdwärmesonden in Bayern. In Zusammenarbeit mit dem Bayerischen Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz und dem Bayerischen Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie. 20 S.; München.
- BUNDESVERBAND WÄRMEPUMPE (BWP) (2007): Wärmepumpenabsatz 2006 Bundesrepublik Deutschland. Internetquelle, Zugriff am 04.04.2007, URL www.waermepumpe-bwp.de/index.php?entryid=137&entry=0.
- BUNDESVERBAND WÄRMEPUMPE (BWP) (2005): Die Sonnenheizung - Das harmonische Wärmeprinzip. 20 S.; München.
- CHIASSON, A. D. (1999): *Advances in Modeling of Ground-Source Heat Pump Systems*. Masterthesis, 155 pp., Oklahoma State University.

Literaturverzeichnis

- EISBACHER, G. H. (1996): Einführung in die Tektonik. 374 S.; Stuttgart: Enke - ISBN 3-432-99252-1.
- ERB, M., HUBACHER, P. & EHRBAR, M. (2004): Feldanalyse von Wärmepumpenanlagen FAWA 1996-2003. Schlussbericht. Im Auftrag des Schweizer Bundesamts für Energie, Bern.
- ESKILSON, P. (1986): Superposition Borehole Model. Manual for Computer Code. Department of Mathematical Physics, Lund Institute of Technology. Lund, Sweden.
- ESKILSON, P. (1987): Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes. Department of Mathematical Physics, Lund Institute of Technology. Lund, Sweden.
- FERNÁNDEZ-STEGER, T. M. (2002): Erkundung von Hangrutschungssystemen mit Neuronalen Netzen als Grundlage für Georisikoanalysen. Dissertation, 140 S.; Universität Karlsruhe (TH).
- FISCHER, I., HENNECKE, F., BANNES, C. & ZELL, A. (): JavaNNS Java Neural Network Simulator User Manual, Version 1.1. 33 pp.; University of Tübingen.
- FLOOD, I. & KARTAM, N. (1994): Neural Networks in Civil Engineering. I: Principles and Understanding. Journal of Computing in Civil Engineering, **8**, 2: 131–148; New York.
- GANGOPADHYAY, S., GAUTAM, T. R. & GUPTA, A. D. (1999): Subsurface Characterization Using Artificial Neural Network and GIS. Journal of Computing in Civil Engineering, **13**, 3: 153–161; New York.
- GERTEC GMBH - INGENIEURGESELLSCHAFT (2001): Systemvergleich: Elektrowärmepumpen und andere Heizungssysteme für Niedrig-Energie-Wohngebäude. Endbericht zu den Phasen I und II. Im Auftrag von: Hessisches Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft und Forsten, Verband der Elektrizitätswirtschaft - VDEW - e.V. Landesgruppe Hessen.
- GEYER, O. F. & GWINNER, M. P. (1991): Geologie von Baden-Württemberg. 482 S.; Stuttgart: Schweizerbart - ISBN 3-510-65146-4.

- GUERNSEY, E. N., BETZ, P. L. & SKAN, N. H. (1949): Earth as a heat source and storage medium for the heat pump. *Ashrae Trans*, **55**: 321–344; New York.
- HALOZAN, H. & HOLZAPFEL, K.-O. (1987): Heizen mit Wärmepumpen: ein Informationspaket. 80 S.; Köln: TÜV Rheinland.
- HECHT-NIELSEN, R. (1987): Kolmogorov's mapping neural network existence theorem. *Proceedings of the first IEEE Joint Conference on Neural Networks*, 11–14; New York.
- HECHT-NIELSEN, R. (1989): Theory of the backpropagation neural network. *IEEE International Joint Conference on Neural Networks*, 593–605; New York.
- HELLSTRÖM, G. & SANNER, B. (2000): EED - Earth Energy Designer. User Manual, Version 2.0. URL www.buildingphysics.com/manuals/eed.pdf.
- HELLSTRÖM, G. & SANNER, B. (1994): PC-Programm zur Auslegung von Erdwärmesonden. *IZW-Bericht 1/94*, 341–350; Karlsruhe.
- HENNINGSSEN, D. & KATZUNG, G. (1998): Einführung in die Geologie Deutschlands. 244 S.; Stuttgart: Enke - ISBN 3-432-88515-6.
- HERRMANN, V. J. (2003): Entwicklung neuer Hinterfüllmassen für un tiefe Erdwärmesonden. Diplomarbeit (unveröff.), 163 S.; Universität Karlsruhe (TH).
- HERRMANN, V. J. & CZURDA, K. (2007): Systemsicherheit und Frostbeständigkeit von Hinterfüllbaustoffen für Erdwärmesonden. OSTBAYERISCHES TECHNOLOGIE-TRANSFER-INSTITUT REGENSBURG (Hrsg.) OTTI-Anwenderforum Oberflächennahe Geothermie, 159–163.
- HERRMANN, V. J., RÜSGEN, M. I., ZORN, R., STEGER, H., HAUS, R., PRIESS, C., SCHRAMEDEI, R. & LEYENS, D. (2004): Technikumsversuch zum Vergleich thermisch verbesserter und herkömmlicher Hinterfüllmassen für un tiefe Erdwärmesonden. OSTBAYERISCHES TECHNOLOGIE-TRANSFER-INSTITUT REGENSBURG (Hrsg.) OTTI-Profiforum Oberflächennahe Geothermie, 203–208.

Literaturverzeichnis

- HOHBERGER, K.-H., KAMPF, J. & WERNER, J. (2002): Leitfaden zur Nutzung von Erdwärme mit Erdwärmesonden. 18 S.; Ministerium für Umwelt und Forsten Rheinland-Pfalz; Mainz.
- HORNIK, K., STINCHCOMBE, M. & WHITE, H. (1989): Multilayer Feedforward Networks are Universal Approximators. *Neural Networks*, **2**: 359–366; Amsterdam: Elsevier.
- HUBER, A. & PAHUD, D. (1999): Erweiterung des Programms EWS für Erdwärmesondenfelder. Schweizer Bundesamt für Energiewirtschaft, Bern. ENET-Nr. 9658807-2.
- HUBER, A. & SCHULER, O. (1997): Berechnungsmodul für Erdwärmesonden. Schweizer Bundesamt für Energiewirtschaft, Bern. ENET-Nr. 9658807-1.
- HUNN, M. (2004): Das Testfeld in Herbrachhofen und Untersuchungen neuer Hinterfüllmassen für un tiefe Erdwärmesonden im Technikumsversuch. Diplomarbeit (unveröff.), Universität Karlsruhe (TH).
- IE (1999): Umweltwärme für Gebäude und Betrieb - Mittelgroße Wärmepumpenanlagen. Informationsbroschüre des Landesgewerbeamts Baden-Württemberg, IE Informationszentrum Energie, 24 S.; Stuttgart.
- KALTSCHMITT, M., WIESE, A. & STREICHER, W. (2003): Erneuerbare Energien - Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte. 692 S.; Berlin: Springer - ISBN 3-540-43600-6.
- KIRN, H. (1983): Wärmepumpen - Band 1: Grundlagen der Wärmepumpentechnik. 259 S.; Karlsruhe: Müller - ISBN 3-7880-7209-1.
- KOENIGSDORFF, R. (2007): GEO-HANDlight - Handrechenverfahren zur überschlägigen Bemessung von Erdwärmesondenfeldern. OSTBAYERISCHES TECHNOLOGIE-TRANSFER-INSTITUT REGENSBURG (Hrsg.) OTTI-Anwenderforum Oberflächennahe Geothermie, 97–101.
- KOENIGSDORFF, R. & SEDLAK, M. (2006): Programmpaket GEOSYST: Weiterentwicklung und Tests von Auslegungswerkzeugen für die geothermische Heizung und Kühlung. Mehr Energie von unten. Tagungsband der 9. Geothermischen Fachtagung 2006 in Karlsruhe, 15.-17.11.2006, 216–224.

- KRUSE, H. & HEIDELCK, R. (2002): Heizen mit Wärmepumpen: ein Informationspaket. 110 S.; Köln: TÜV Verlag - ISBN 3-8249-0641-4.
- KUMAR, J. K., KONNO, M. & YASUDA, N. (2000): Subsurface Soil-Geology Interpolation Using Fuzzy Neural Network. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **126**, 7: 632–639; New York.
- KUMAR, M., RAGHUWANSHI, N. S., SINGH, R., WALLENDER, W. W. & PRUITT, W. O. (2002): Estimating Evapotranspiration using Artificial Neural Network. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, **128**, 4: 224–233; New York.
- LABHART, T. P. (1992): *Geologie der Schweiz*. 211 S.; Thun: Ott - ISBN 3-7225-6298-8.
- LEE, S., RYU, J.-H., MIN, K. & WON, J.-S. (2003): Landslide Susceptibility Analysis Using GIS and Artificial Neural Network. *Earth Surface Processes and Landforms*, **28**: 1361–1376; New York.
- LGRB (2001a): Ergänzende hydrogeologische Hinweise zu Erdwärmesonden. 12 S.; Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg, Freiburg i. Breisgau.
- LGRB (2001b): Leitfaden Erdwärmesonden. 11 S.; Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg, Freiburg i. Breisgau.
- LGRB (2005): Leitfaden zur Nutzung von Erdwärme mit Erdwärmesonden. 28 S.; Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg, Freiburg i. Breisgau.
- LIESCH, T. (2006): Ermittlung der Grundwassergefährdung mit Hilfe künstlicher neuronaler Netze. Dissertation, 129 S.; Universität Karlsruhe (TH).
- MAIER, H. R. & DANDY, G. C. (1998): The effect of internal parameters and geometry on the performance of backpropagation neural networks: an empirical study. *Environmental Modelling & Software*, **13**: 193–209; Amsterdam: Elsevier.
- MAIER, H. R. & DANDY, G. C. (2000): Neural networks for the prediction and forecasting of water resource variables: a review of modelling issues and applications. *Environmental Modelling & Software*, **15**: 101–124; Amsterdam: Elsevier.

- MAREN, A. J., HARSTON, C. T. & PAP, R. M. (1990): Handbook of Neural Computing Applications. 448 S.; San Diego: Academic Press - ISBN 0-12-546090-2.
- MAYORAZ, F. & VULLIET, L. (2002): Neural Networks for Slope Movement Prediction. *International Journal of Geomechanics*, **2**, 2: 153–173; Reston.
- NEAUPANE, K. & ACHET, S. (2004): Some Applications of a backpropagation neural network in geo-engineering. *Environmental Geology*, **45**: 567–575; New York: Springer.
- ONDREKA, J. (2004): Anwendung und Weiterentwicklung einer GIS gestützten Methode zur Ermittlung des Potentials von Erdwärmesonden am Beispiel des Ortenaukreises. Diplomarbeit (unveröff.), 111 S., 33 Abb., 13 Tab.; Universität Karlsruhe (TH).
- ONDREKA, J., RÜSGEN, M., STOBER, I. & CZURDA, K. (2007): GIS supported mapping of shallow geothermal potential of representative areas in south-western Germany - Possibilities and limitations. *Renewable Energy*, **32**: 2186–2200; Amsterdam: Elsevier.
- ROGERS, L. L. & DOWLA, F. U. (1994): Optimization of groundwater remediation using neural networks with parallel solute transport modeling. *Water Resources Research*, **30**: 457–481; Washington D.C.
- ROGNON, F. (Hrsg.) (2004): FAWA - Feldanalyse von Wärmepumpenanlagen. Tagungsband zur 11. Tagung des Forschungsprogramms Umgebungswärme, Wärme-Kraft-Kopplung, Kälte des Bundesamts für Energie (BfE), Bundesamt für Energie, Schweiz.
- ROJAS, R. (1996): Theorie der neuronalen Netze - Eine systematische Einführung. 445 S.; Berlin: Springer - ISBN 3-540-56353-9.
- RÜSGEN, M. & CZURDA, K. (2006): Künstliche Neuronale Netze für die Untergrundbewertung in der oberflächennahen Geothermie. Mehr Energie von unten. Tagungsband der 9. Geothermischen Fachtagung 2006 in Karlsruhe, 15.-17.11.2006, 225–230.
- RÜSGEN, M. I. (2003): Entwicklungsbegleitende Untersuchungen und theoretische Betrachtungen zu neuen Hinterfüllmassen für oberflächennahe Erdwärmesonden. Diplomarbeit (unveröff.), 108 S., 64 Abb., 22 Tab.; Universität Karlsruhe (TH).

- SAWILLION, M. (2006): Ergebnisse des baden-württembergischen Förderprogramms „Oberflächennahe Geothermie“. Mehr Energie von unten. Tagungsband der 9. Geothermischen Fachtagung 2006 in Karlsruhe, 15.-17.11.2006.
- SCHENK, W. (2004): Erdgekoppelte Wärmepumpen - Beispiele ausgeführter Anlagen und Betriebserfahrungen. OSTBAYERISCHES TECHNOLOGIE-TRANSFER-INSTITUT REGENSBURG (Hrsg.) OTTI-Profforum Oberflächennahe Geothermie, 179–192.
- SCHÖNENBERG, R. & NEUGEBAUER, J. (1997): Einführung in die Geologie Europas. 385 S.; Freiburg i. Breisgau: Rombach - ISBN 3-7930-9147-3.
- SHAHIN, M. A., MAIER, H. R. & JAKSA, M. B. (2004): Data Division for Developing Neural Networks Applied to Geotechnical Engineering. Journal of Computing in Civil Engineering, **18**: 105–114; New York.
- SHIGIDI, A. & GARCIA, L. A. (2003): Parameter Estimation in Groundwater Hydrology Using Artificial Neural Networks. Journal of Computing in Civil Engineering, **17**, 4: 281–289; New York.
- SIGNORELLI, S. (2004): Geoscientific Investigations for the Use of Shallow Low-Enthalpy Systems. Dissertation, 159 S.; ETH Zürich.
- VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (Hrsg.) (2000): VDI 4640: Thermische Nutzung des Untergrundes, Blatt 1: Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte.
- VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (Hrsg.) (2001): VDI 4640: Thermische Nutzung des Untergrundes, Blatt 2: Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen.
- VON CUBE, H. L. & STEIMLE, F. (1984): Wärmepumpen: Grundlagen und Praxis. 365 S.; Düsseldorf: VDI-Verlag - ISBN 3-18-400540-2.
- WALTER, R. (1995): Geologie von Mitteleuropa. 566 S.; Stuttgart: Schweizerbart - ISBN 3-510-65167-7.
- WEIGEND, A. S., RUMMELHART, D. E. & HUBERMANN, B. A. (1990): Predicting the Future: A connectionist approach. International Journal of Neural Systems, **1**: 193–209; Singapore.

WOERNLE, M. & CZURDA, K. (2007): Künstliche Neuronale Netze zur Unterstützung der Planung von Erdwärmesonden. OSTBAYERISCHES TECHNOLOGIE-TRANSFER-INSTITUT REGENSBURG (Hrsg.) OTTI-Anwenderforum Oberflächennahe Geothermie, 105–109.

ZELL, A. (1994): Simulation Neuronaler Netze. 624 S.; Bonn: Addison-Wesley - ISBN 3-89319-554-8.

Zitierte Normen:

DIN 4022 Teil 1 (Sept. 1987): Baugrund und Grundwasser; Benennen und Beschreiben von Boden und Fels, Schichtenverzeichnis für Bohrungen ohne durchgehende Gewinnung von gekernten Proben im Boden und Fels.

DIN 4022 Teil 2 (März 1981): Baugrund und Grundwasser; Benennen und Beschreiben von Boden und Fels, Schichtenverzeichnis für Bohrungen im Fels (Festgestein).

DIN 4022 Teil 3 (Mai 1982): Baugrund und Grundwasser; Benennen und Beschreiben von Boden und Fels, Schichtenverzeichnis für Bohrungen mit durchgehender Gewinnung von gekernten Proben im Boden (Lockergestein).

DIN EN ISO 14688-1 (Jan. 2003): Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden - Teil 1: Benennung und Beschreibung.

DIN EN ISO 14688-2 (Nov. 2004): Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden - Teil 2: Grundlagen für Bodenklassifizierungen.

DIN EN ISO 14689-1 (April 2004): Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Fels - Teil 1: Benennung und Beschreibung.

DIN EN ISO 22475-1 (Jan. 2007): Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Probenentnahmeverfahren und Grundwassermessungen - Teil 1: Technische Grundlagen der Ausführung.

A Abkürzungen und Formelzeichen

Abkürzung Erläuterung

ANN	artificial neural network
BHE	borehole heat exchanger
BW	Baden-Württemberg
BWP	Bundesverband Wärmepumpe e.V.
CH	Schweiz
FAWA	Feldanalyse von Wärmepumpenanlagen
KNN	künstliche neuronale Netze
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VBI	Verband Beratender Ingenieure
WLF	Wärmeleitfähigkeit

Zeichen	Erläuterung	Einheit
$a_j(t)$	Aktivierung des Neurons j zum Zeitpunkt t	
d	vorkommendes Werteintervall einer beliebigen Variablen	
f_{act}	Aktivierungsfunktion	
f_{out}	Ausgabefunktion	
i, j	Zählindex	
$net_j(t)$	Netzeingabe des Neurons j zum Zeitpunkt t	
o_j	Ausgabe des Neurons j	
x	beliebiger Variablenwert	
mQ	mittlere jährlich bereitgestellte Wärme	kWh
mQ_{geo}	mittlere jährlich geothermisch bereitgestellte Wärme	kWh

A Abkürzungen und Formelzeichen

mT _{VL}	mittlere Vorlauftemperatur	°C
Ausl	Auslastung am Auslegepunkt	-
BT01	gesamte wirksame Mächtigkeit <i>Boden, trocken und locker</i>	m
BT02	gesamte wirksame Mächtigkeit <i>Festgestein oder wasserführendes Lockergestein</i>	m
BT03	gesamte wirksame Mächtigkeit <i>Festgestein mit hoher WLF</i>	m
BT04	gesamte wirksame Mächtigkeit <i>Kies/Sand, trocken</i>	m
BT05	gesamte wirksame Mächtigkeit <i>Kies/Sand, wasserführend</i>	m
BT06	gesamte wirksame Mächtigkeit <i>Ton/Lehm, feucht</i>	m
BT07	gesamte wirksame Mächtigkeit <i>Kalkstein</i>	m
BT08	gesamte wirksame Mächtigkeit <i>Sandstein</i>	m
BT09	gesamte wirksame Mächtigkeit <i>Granit</i>	m
BT10	gesamte wirksame Mächtigkeit <i>Basalt</i>	m
BT11	gesamte wirksame Mächtigkeit <i>Gneis</i>	m
BT12	gesamte wirksame Mächtigkeit <i>Mergel</i>	m
BT13	gesamte wirksame Mächtigkeit <i>Nagelfluh</i>	m
D	Endteufe, Sondentiefe	m
FSG	Gehalt an Frostschutzmittel	%
HLWP	Heizleistung Wärmepumpe	kW
JAZ	Jahresarbeitszahl	-
JMT	Jahresmitteltemperatur	°C
MSE	mittlerer quadratischer Fehler (<i>mean square error</i>)	
P	Leistung	W
Q	Wärme, Energie	Ws
RD	Außendurchmesser der Sondenrohre	mm
SL	Sondenlänge (= $SZ \cdot D$)	m
SZ	Sondenanzahl	-
T	Temperatur	°C
T _Q	Quellentemperatur	°C
T _{VL}	Vorlauftemperatur	°C
T _{RL}	Rücklauftemperatur	°C

T_S	Soletemperatur	$^{\circ}\text{C}$
WWB	Art der Warmwasserbereitung	-
ε	Leistungsziffer	-
ε_c	Leistungsziffer nach Carnot	-
λ	Wärmeleitfähigkeit	$\frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$
θ_j	Schwellenwert des Neurons j	

B Geologische Übersichtskarten

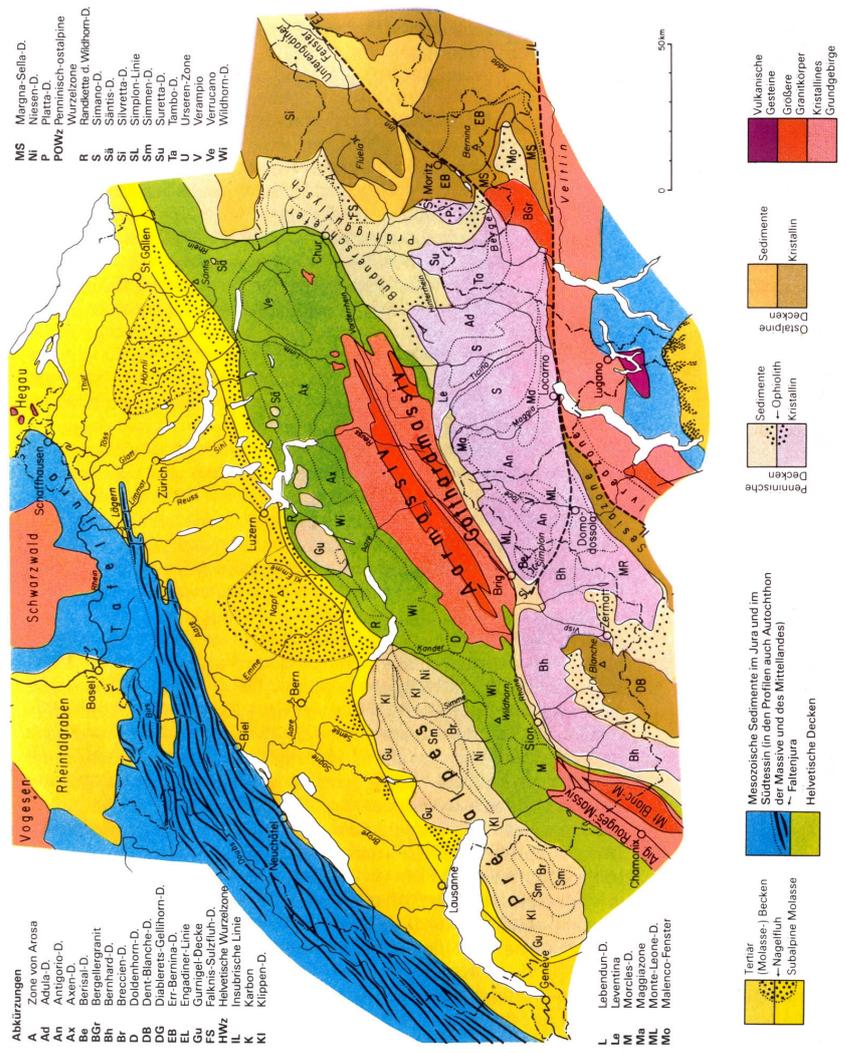


Abbildung B.1: Geologische Übersichtskarte der Schweiz nach LABHART (1992).

B Geologische Übersichtskarten

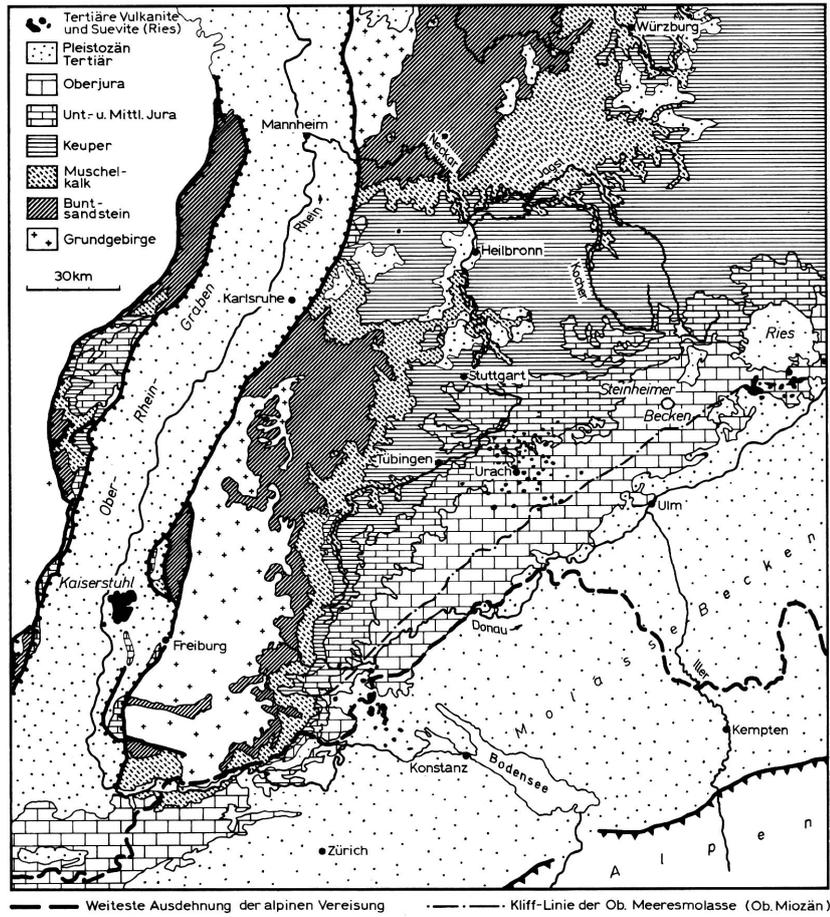


Abbildung B.2: Geologische Übersichtskarte von Südwestdeutschland (GEYER & GWINNER, 1991).