

Thermische Nutzung von Oberflächengewässern



Florian Schwinghammer

**Institut für Hydrologie
der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br.**

Referent: Prof. Dr. Markus Weiler

Koreferent: Dr. Markus Kübert

Masterarbeit unter der Leitung von Prof. Dr. Markus Weiler

Freiburg i. Br., Dezember 2012

Ehrenwörtliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Freiburg i. Br., den 21.12.2012

Unterschrift

Danksagung

Für die Vergabe des Themas und die Unterstützung beim Verfassen der Arbeit möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. Markus Weiler bedanken.

Ein besonderer Dank gilt Herrn Dr. Markus Kübert für die fachliche Betreuung und die vielen interessanten Diskussionen, aus denen viele Ideen für diese Arbeit entstanden sind.

Weiterhin möchte ich mich bei folgenden Personen bedanken:

- Bei Frau Prof. Dr. Simone Walker-Hertkorn, für die Möglichkeit, im Büro der Firma tewag GmbH meine Arbeit zu verfassen und für viele nützliche Informationen
- Bei Herrn Dr. David Kuntz für die vielen Ratschläge und die lebhaften Gespräche auch außerhalb des Büros
- Bei allen weiteren Mitarbeitern der tewag GmbH für die herzliche Aufnahme und das sehr gute Arbeitsklima
- Bei allen Personen, die mir im Verlauf der Erstellung dieser Arbeit Informationen jeglicher Art zukommen haben lassen

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	i
Tabellenverzeichnis.....	vi
Abkürzungen	viii
Erläuterungen	ix
Abstract	x
Zusammenfassung.....	xi
1. Einleitung.....	1
2. Überblick über die Arbeit und Zielsetzung.....	3
3. Systeme zur thermischen Nutzung von Oberflächengewässern und technische Anforderungen.....	4
3.1 Allgemeine technische Informationen	4
3.2 Systemvarianten für das geschlossene System	9
3.2.1 maxloidverfahren	9
3.2.1.1 Anwendung in Flüssen.....	10
3.2.1.2 Anwendung in Seen	11
3.2.2 LIMNION LIMA-1	13
3.3 Systemvariante für das offene System.....	15
4. Gesetzeslage zur thermischen Nutzung von Oberflächengewässern.....	16
4.1 Die europäische Wasserrahmenrichtlinie (WRRL)	16
4.2 Das Wasserhaushaltsgesetz (WHG)	17

4.3	Das Wassergesetz Baden-Württemberg (WG).....	21
4.4	Gesetzliche Regelung in der Schweiz	22
5.	Praxisbeispiele bereits realisierter Anlagen	25
5.1	Nahwärmenetz Lauterecken.....	25
5.2	Vulkansee Eifel (Campingplatz Laacher See)	28
5.3	Rathaus Zürich	30
5.4	Wärmepumpenanlage Walche ETH Zürich	32
6.	Potentialkarte zur thermischen Nutzung von Oberflächengewässern in Baden-Württemberg.....	38
6.1	Inhalt der Karte und Zielstellung	38
6.2	Datengrundlage	38
6.3	Datenauswahl	39
6.4	Vorgehensweise bei der Kartenerstellung.....	40
6.5	Berechnung der potentiellen Entzugsleistungen der erstellten Flussabschnitte.....	43
6.6	Berechnung der Mischwassertemperaturen	48
7.	Ergebnisse der Mischwassertemperaturberechnung und der Berechnung der potentiellen Entzugsleistung für die Flussabschnitte Heilbronn und Ulm.....	51
7.1	Betrachtung der Mischwassertemperaturen im Verhältnis zu verschiedenen Grenzwerten	51
7.2	Nachberechnung der Mischwassertemperatur am Beispiel des Nahwärmenetzes der Stadt Lauterecken.....	53
7.3	Ergebnisse der Berechnung der potentiellen Entzugsleistungen für die Flussabschnitte Heilbronn und Ulm.....	56
7.3.1	Flussabschnitt Heilbronn	58
7.3.1.1	Kälteentzugsleistung im Flussabschnitt Heilbronn	58

7.3.1.2	Wärmeentzugsleistung im Flussabschnitt Heilbronn	62
7.3.1.3	Saisonales Leistungsangebot im Flussabschnitt Heilbronn	67
7.3.2	Flussabschnitt Ulm.....	71
7.3.2.1	Kälteentzugsleistung im Flussabschnitt Ulm.....	71
7.3.2.2	Wärmeentzugsleistung im Flussabschnitt Ulm.....	76
7.3.2.3	Saisonales Leistungsangebot im Flussabschnitt Ulm	81
8.	Bewertung der Ergebnisse	85
8.1	Bewertung der Flussabschnitte Heilbronn und Ulm.....	85
8.2	Bewertung der verschiedenen Temperaturszenarien	86
8.2.1	Bewertung absolute Extremtemperatur	86
8.2.2	Bewertung mittlere jährliche Extremtemperatur.....	87
8.2.3	Bewertung mittlere Sommer- bzw. Wintertemperatur.....	87
8.2.4	Bewertung mittlere Monatstemperatur	88
8.2.5	Vergleich $T_{\text{mittel Sommer/Winter}}$, $T_{\text{mittel jährlich Max/Min}}$, $T_{\text{Max/Min}}$ und mittlere Monatstemperatur	89
9.	Schlussfolgerungen.....	90
10.	Quellenverzeichnis	92
11.	Anhang.....	97

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schema einer Wärmepumpenanlage (Quelle: THOLEN & WALKER-HERTKORN, 2007).....	4
Abbildung 2: Schema eines offenen Systems ohne Zwischenkreislauf (verändert nach: UM, 2009)	6
Abbildung 3: Schema eines offenen Systems mit Zwischenkreislauf (Quelle: UM, 2009)	7
Abbildung 4: Schema zur aktiven Kühlung mit einem offenen System ohne Zwischenkreislauf (verändert nach: UM, 2009)	8
Abbildung 5: Anordnung der länglichen Wärmetauscher hinter Gitterstäben (Quelle: www.maxloidlverfahren.de)	10
Abbildung 6: Konstruktion zur Verwendung in Seen (Quelle: www.maxloidlverfahren.de)	11
Abbildung 7: Schema zur Funktionsweise des maxloidverfahren in einem See (Quelle: www.maxloidlverfahren.de)	12
Abbildung 8: LIMNION LIMA-1 (Quelle: FRANK GmbH Produktbroschüre).....	13
Abbildung 9: Installationsvarianten des LIMNION LIMA-1: links mit Gewicht; rechts befestigt an Bootssteg (Quelle: FRANK GmbH Produktbroschüre)	14
Abbildung 10: Parallelschaltung des LIMNION LIMA-1 (Quelle: FRANK GmbH Produktbroschüre)	14
Abbildung 11: Aufbau der Rechtsordnung im Bereich Wasser (Quelle: HÄHNLEIN et al., 2011).....	16
Abbildung 12: Einteilung der Wassergefährdungsklassen nach der VAUwS (Quelle: VAUwS, 2011).....	20

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 13: Übersichtsplan des Nahwärmenetzes Lauterecken (Quelle: www.thermea.de).....	25
Abbildung 14: Entnahmestelle aus dem Mühlgraben der Lauter (Quelle: www.thermea.de).....	26
Abbildung 15: Rathaus in Zürich mit unter dem Gebäude durchfließendem Fluss Limnat.....	30
Abbildung 16: Schemaskizze des Rathaus Zürich mit WP- und Belüftungssystem (verändert nach: EGLI, 1938).....	31
Abbildung 17: Skizze der WP-Anlage Walche in Zürich (Quelle: AMT FÜR BUNDESBAUTEN, 1988).....	33
Abbildung 18: Kugelfilter oberhalb des Verdampfers	36
Abbildung 19: Grundrissplan der WP-Anlage Walche mit zwei gekoppelten WP (verändert nach: AMT FÜR BUNDESBAUTEN, 1988).....	37
Abbildung 20: A: Originalfluss mit Temperaturmessstellen; B: Originalfluss wird an Temperaturmessstellen geteilt; C: Sechs neu erstellte Flussabschnitte.....	41
Abbildung 21: A: Flussabschnitte mit Abflussmessstellen; B: Flussabschnitte an Abflussmessstellen teilen; C: 13 neu erstellte Flussabschnitte; D: 13 neue Flussabschnitte mit Abfluss- und Temperaturmessstellen	42
Abbildung 22: Flussabschnitt Heilbronn mit Siedlungsdichte und Bebauungsart	44
Abbildung 23: Flussabschnitt Ulm mit Siedlungsdichte und Bebauungsart	44
Abbildung 24: Schemaskizze zur Mischwassertemperaturberechnung.....	48
Abbildung 25: Temperaturveränderung des Mischwassers in Abhängigkeit von der Temperaturspreizung im WP-Kreislauf.....	52
Abbildung 26: Temperaturveränderung des Mischwassers in Abhängigkeit von der Temperaturspreizung im WP-Kreislauf am Beispiel des Nahwärmenetzes Lauterecken.....	54

Abbildung 27: Beispieldiagramm zum besseren Verständnis der weiteren Ergebnisse	57
Abbildung 28: Potentielle Kälteentzugsleistung für verschiedene Entnahmeraten des jeweiligen Niedrigwasserabflusses für T_{Max} im Flussabschnitt Heilbronn	58
Abbildung 29: Potentielle Kälteentzugsleistung für verschiedene Entnahmeraten des jeweiligen Niedrigwasserabflusses für $T_{mittel\ jährl.\ Max}$ im Flussabschnitt Heilbronn	59
Abbildung 30: Potentielle Kälteentzugsleistung für verschiedene Entnahmeraten des jeweiligen Niedrigwasserabflusses für $T_{mittel\ Sommer}$ im Flussabschnitt Heilbronn	60
Abbildung 31: Vergleich des Leistungsangebots im Winter für Entnahmeraten von 1% und 5% des MNQ für T_{Max} , $T_{mittel\ jährl.\ Max}$ und $T_{mittel\ Sommer}$ im Flussabschnitt Heilbronn.....	61
Abbildung 32: Vergleich des Leistungsangebots im Sommer für verschiedene Entnahmeraten des MNQ für T_{max} , $T_{mittel\ Sommer}$ und $T_{mittel\ jährl.\ Max}$ im Flussabschnitt Heilbronn	62
Abbildung 33: Potentielle Wärmeentzugsleistung für verschiedene Entnahmeraten des jeweiligen Niedrigwasserabflusses für T_{Min} im Flussabschnitt Heilbronn .	63
Abbildung 34: Potentielle Wärmeentzugsleistung für verschiedene Entnahmeraten des jeweiligen Niedrigwasserabflusses für $T_{mittel\ jährl.\ Min}$ im Flussabschnitt Heilbronn	64
Abbildung 35: Potentielle Wärmeentzugsleistung für verschiedene Entnahmeraten des jeweiligen Niedrigwasserabflusses für $T_{mittel\ Winter}$ im Flussabschnitt Heilbronn	65
Abbildung 36: Vergleich des Leistungsangebots im Winter für Entnahmeraten von 1% und 5% des MNQ für T_{Min} , $T_{mittel\ jährl.\ Min}$ und $T_{mittel\ Winter}$ im Flussabschnitt Heilbronn	66

Abbildung 37: Vergleich des Leistungsangebots im Winter für verschiedene Entnahmeraten des MNQ für T_{Min} , $T_{\text{mittel Winter}}$ und $T_{\text{mittel jährl. Min}}$ im Flussabschnitt Heilbronn	67
Abbildung 38: Jahresverlauf des potentiellen Leistungsangebots für verschiedene Entnahmeraten des MNQ im Flussabschnitt Heilbronn	68
Abbildung 39: Verlauf des Leistungsangebots im Winter für verschiedene Entnahmeraten des MNQ im Flussabschnitt Heilbronn	69
Abbildung 40: Verlauf des Leistungsangebots im Sommer für verschiedene Entnahmeraten des MNQ im Flussabschnitt Heilbronn	69
Abbildung 41: Potentielle Kälteentzugsleistung für verschiedene Entnahmeraten des jeweiligen Niedrigwasserabflusses für T_{Max} im Flussabschnitt Ulm	71
Abbildung 42: Potentielle Kälteentzugsleistung für verschiedene Entnahmeraten des jeweiligen Niedrigwasserabflusses für $T_{\text{mittel jährl Max}}$ im Flussabschnitt Ulm	72
Abbildung 43: Potentielle Kälteentzugsleistung für verschiedene Entnahmeraten des jeweiligen Niedrigwasserabflusses für $T_{\text{mittel Sommer}}$ im Flussabschnitt Ulm	73
Abbildung 44: Vergleich des Leistungsangebots im Sommer für Entnahmeraten von 1% und 5% des MNQ für T_{Max} , $T_{\text{mittel jährl Max}}$ und $T_{\text{mittel Sommer}}$ im Flussabschnitt Ulm	75
Abbildung 45: Vergleich des Leistungsangebots im Sommer für verschiedene Entnahmeraten des MNQ für T_{max} , $T_{\text{mittel Sommer}}$ und $T_{\text{mittel jährl. Max}}$ im Flussabschnitt Ulm	76
Abbildung 46: Potentielle Wärmeentzugsleistung für verschiedene Entnahmeraten des jeweiligen Niedrigwasserabflusses für T_{Min} im Flussabschnitt Ulm	77
Abbildung 47: Potentielle Wärmeentzugsleistung für verschiedene Entnahmeraten des jeweiligen Niedrigwasserabflusses für $T_{\text{mittel jährl. Min}}$ im Flussabschnitt Ulm	77

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 48: Potentielle Wärmeentzugsleistung für verschiedene Entnahmeraten des jeweiligen Niedrigwasserabflusses für $T_{\text{mittel Winter}}$ im Flussabschnitt Ulm.....	78
Abbildung 49: Vergleich des Leistungsangebots im Winter für Entnahmeraten von 1% und 5% des MNQ für T_{Min} , $T_{\text{mittel jährl Min}}$ und $T_{\text{mittel Winter}}$ im Flussabschnitt Ulm.....	80
Abbildung 50: Vergleich des Leistungsangebots im Winter für verschiedene Entnahmeraten des MNQ für T_{Min} , $T_{\text{mittel Winter}}$ und $T_{\text{mittel jährl. Min}}$ im Flussabschnitt Ulm.....	81
Abbildung 51: Jahresverlauf des potentiellen Leistungsangebots für verschiedene Entnahmeraten des MNQ im Flussabschnitt Ulm.....	82
Abbildung 52: Verlauf des Leistungsangebots im Winter für verschiedene Entnahmeraten des MNQ im Flussabschnitt Ulm.....	83
Abbildung 53: Verlauf des Leistungsangebots im Sommer für verschiedene Entnahmeraten des MNQ im Flussabschnitt Ulm.....	83

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Technische Details Wärmepumpenanlage Lauterecken (verändert nach: GERDES, 2012)	27
Tabelle 2:	Technische Details Wärmepumpenanlage Walche ETH Zürich (verändert nach AMT FÜR BUNDESBAUTEN, 1988)	35
Tabelle 3:	vorhandene Temperaturgrenzwerte und deren Herkunft.....	45
Tabelle 4:	Maximale potentielle Temperaturspreizungen für den Heizfall bei verschiedenen Ausgangswassertemperaturen.....	46
Tabelle 5:	Maximale potentielle Temperaturspreizungen für den Kühlfall bei verschiedenen Ausgangswassertemperaturen.....	47
Tabelle 6:	Ausgangsdaten zur Mischwassertemperaturberechnung.....	50
Tabelle 7:	Mischwassertemperaturwerte in Abhängigkeit von der Entnahmerate	52
Tabelle 8:	Ergebnisse der Mischwasserberechnung für den Fluss Lauter bei einer reellen Entnahmerate von 1,4 %	55
Tabelle 9:	Ergebnisse der Mischwasserberechnung für den Fluss Lauter bei einer theoretischen Entnahmerate von 20 %	56
Tabelle 10:	Potentielle Kälteentzugsleistung für verschiedene Entnahmeraten des jeweiligen Niedrigwasserabflusses für T_{Max} , $T_{mittel Sommer}$ und $T_{mittel jährl. Max}$ im Flussabschnitt Heilbronn	60
Tabelle 11:	Potentielle Wärmeentzugsleistung für verschiedene Entnahmeraten des jeweiligen Niedrigwasserabflusses für T_{Min} , $T_{mittel Winter}$ und $T_{mittel jährl. Min}$ im Flussabschnitt Heilbronn	65
Tabelle 12:	Monatliches Leistungsangebot für verschiedene Entnahmeraten des MNQ im Flussabschnitt Heilbronn.....	70

Tabellenverzeichnis

Tabelle 13:	Potentielle Kälteentzugsleistung für verschiedene Entnahmeraten des jeweiligen Niedrigwasserabflusses für T_{Max} , $T_{\text{mittel Sommer}}$ und $T_{\text{mittel jährl. Max}}$ im Flussabschnitt Ulm	74
Tabelle 14:	Potentielle Wärmeentzugsleistung für verschiedene Entnahmeraten des jeweiligen Niedrigwasserabflusses für T_{Min} , $T_{\text{mittel Winter}}$ und $T_{\text{mittel jährl. Min}}$ im Flussabschnitt Ulm.....	79
Tabelle 15:	Monatliches Leistungsangebot für verschiedene Entnahmeraten des MNQ im Flussabschnitt Ulm	84
Tabelle 16:	Vor- und Nachteile der einzelnen verwendeten Temperaturszenarien	89

Abkürzungen

- GIS: Geoinformationssystem
- JAZ: Jahresarbeitszahl; Verhältnis zwischen Nutzen (an das Heizmedium, also das Heizungswasser, abgegebene Wärmemenge) und Aufwand (zugeführte elektrische Energie für den Verdichter) bezogen auf ein Jahr (TIATOR & SCHENKER, 2007)
- MNQ: Mittlerer Niedrigwasserabfluss; Mittelwert aus den absoluten Niedrigwasserabflüssen jedes Jahres einer bestimmten Zeitreihe
- NQ_x: Niedrigwasserabfluss, der statistisch gesehen alle x Jahre auftritt
- Q347: Abfluss, der statistisch gesehen an 347 Tagen im Jahr erreicht oder überschritten wird (ASCHWANDEN & KANN, 1999)
- VDI: Verein Deutscher Ingenieure
- WG: Wassergesetz Baden-Württemberg
- WHG: Wasserhaushaltgesetz
- WP: Wärmepumpe bzw. Wärmepumpen

Erläuterungen

Kaltes Nahwärmenetz:	Erwärmtes Wärmeträgermedium auf niedrigem Temperaturniveau wird über eine Ringleitung zu einzeln angeschlossenen Gebäuden mit separater Wärmepumpe (WP) geleitet
Leistungszahl:	Verhältnis zwischen abgegebener Heizleistung an das Heizwasser und aufgewendeter Antriebsleistung am Verdichter (TIATOR & SCHENKER, 2007)
Sole:	Gemisch aus Wasser mit einem Frostschutzzusatz, i.d.R. Glykol, um Gefrieren des Verdampfers und des Wärmeträgermediums zu verhindern
Vorlauftemperatur:	Temperatur des Heizwassers nach Erhitzen durch die WP, mit der das Gebäude geheizt oder gekühlt wird
Wärmeträgermedium:	Fluid, das die Umweltwärmeenergie in den WP-Kreislauf transportiert und dort an einen Wärmetauscher abgibt
Wärme- bzw. Kälteentzugsleistung:	Leistung, die direkt aus dem Gewässer gewonnen werden kann; dies entspricht nicht der Gesamtwärmeleistung, die auf das Heiz- bzw. Kühlwasser übertragen wird, da im WP-Kreislauf noch elektrische Energie über den Verdichter zugeführt wird

Abstract

The aim of this work is to examine the general use of thermal potential of surface waters, in particular the main surface waters in Baden-Württemberg, Germany. For this, developable thermal potential was calculated using temperature and runoff data for the main water bodies in Baden-Württemberg. Developable reaches have been graphically displayed in maps, which show generally high thermal potential in the evaluated surface waters. These maps can be used as a reference for the planning of future infrastructure that exploits this resource.

Furthermore, this paper touches on the technical requirements needed by heat pump systems for the usage of surface water thermal energy. Technically, several constructions and usage types are possible with water either being removed from the water body for use in the heat exchanger, or performed directly in situ.

In addition to technical issues related to thermal energy use in surface water bodies, the legal issues were also addressed. Currently there are no state or federal laws pertaining to such uses of surface waters. For this absence, Suisse laws could be used as a framework for the development of legislation in Baden-Württemberg, since they already exist in detail and precision.

All thermal systems examined in this study generally work well, though only open systems were evaluated in this study. A common problem seen in these systems is the greater cleaning requirement of intake pipes, due to clogging, than assumed before construction.

Keywords:

thermal potential, surface waters, potential maps, heat pump system, surface water temperature, water legislation

Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit ist es, das Potential zur thermischen Nutzung von Oberflächengewässern generell und im Besonderen der Hauptgewässer in Baden-Württemberg zu berechnen. Dafür wird aus Temperatur- und Abflussdaten der Hauptgewässer Baden-Württembergs die entsprechende mögliche thermische Entzugsleistung bestimmt. Diese Wärme- oder Kälteentzugsleistungen sind für die jeweiligen Flussabschnitte in Potentialkarten grafisch dargestellt. Daraus ist ersichtlich, dass größtenteils hohe Entzugsleistungen möglich sind und damit ein großes thermisches Potential in den Oberflächengewässern vorhanden ist. Diese Potentialkarten können als Anhaltspunkt bei der Planung von zukünftigen Anlagen mit thermischer Nutzung von Oberflächengewässern dienen.

Darüber hinaus werden von technischer und gesetzlicher Seite her grundsätzliche Voraussetzungen für Wärmepumpen-Anlagen mit thermischer Oberflächenwassernutzung sowie bereits realisierte Projekte erörtert. Aus technischer Sicht sind verschiedene Konstruktionen und Nutzungsarten möglich. Entweder wird das Wasser entnommen und thermisch genutzt oder die Wärmeübertragung findet mittels eines eingebauten Wärmetauschers direkt im Gewässer statt.

Hinsichtlich der Untersuchung der Gesetzeslage gibt es in Deutschland keine konkreten rechtlichen Vorgaben. Hier müssten neue und umfassende Vorschriften erlassen werden. Diese könnten sich an der Schweizer Gesetzgebung orientieren, die bereits ausführliche und genaue Vorgaben zur thermischen Nutzung von Oberflächengewässern enthält,

Bei den in dieser Arbeit betrachteten Praxisbeispielen, die sich ausschließlich aus offenen Systemen zusammensetzen, ist ein generell guter Anlagenbetrieb möglich. Eine Gemeinsamkeit dieser Praxisbeispiele ist, dass die Reinhaltung der Ansaugleitungen größeren Aufwand erfordert, als vor dem Bau der WP-Anlagen angenommen wurde.

Schlüsselwörter:

Thermische Nutzung, Oberflächengewässer, Potentialkarten, Wärmepumpenanlage, Wasserrecht

1. Einleitung

Im Zuge der Verknappung der Primärenergierohstoffe steigt der Einfluss regenerativer Energiequellen stetig an. Konventionelle Energiequellen wie Erdöl oder Erdgas sind unbestritten limitierte Rohstoffe, die sich in Zukunft stark verteuern werden und dadurch zu wertvoll sind, um für Heizzwecke verwendet zu werden. Seit ca. 15 bis 20 Jahren ist diese Entwicklung auch der breiten Öffentlichkeit bekannt. Seit dieser Zeit sind die Bemühungen, regenerative Energietechniken weiterzuentwickeln und die Effizienz vorhandener Techniken zu steigern, erheblich gestiegen. Eine Form der regenerativen Energiequellen stellt die Geothermie (Geothermische Energie, Erdwärme) dar, die nach VDI-Richtlinie 4640 Blatt 1 (2010) als „*Die in Form von Wärme gespeicherte Energie unterhalb der Oberfläche der festen Erde*“ definiert ist. Mit dieser Technologie lässt sich Gebäudeheizung als auch Gebäudekühlung realisieren, wobei zum Heizen immer der Einsatz einer Wärmepumpe (WP) notwendig ist. Neben herkömmlichen Erdwärmesonden, die mittlerweile allgemein relativ bekannt sind, existieren noch andere Möglichkeiten die Umweltwärme zu nutzen. Diese sind Luft-Wasser-WP oder Wasser-Wasser-WP. Beim erst genannten System wird der Außenluft Wärme entzogen oder zugeführt, die entweder dem Heizwasser zugegeben oder aus diesem entnommen wird. Bei einer Wasser-Wasser-WP wird herkömmlicherweise in einem offenen System Grundwasser genutzt, indem man zwei Brunnenbohrungen ausführt und aus einem Brunnen Wasser fördert und in den anderen Brunnen wieder zurückpumpt. Dazwischen ist wiederum eine WP geschaltet, die dem geförderten Wasser je nach Nutzung Wärmeenergie zugibt oder diese aufnimmt.

Eine Wärme- und Kältequelle, die bisher wenig beachtet wurde, sind Oberflächengewässer, also Fließgewässer und Seen. In diesen Medien ist eine enorme Menge an Wärmeenergie gespeichert, wird aber nur äußerst selten als Wärmequelle und teilweise als Wärmesenke genutzt. Dabei wurde und wird immer noch die weltweit älteste noch funktionierende Wärmepumpe im Züricher Rathaus mit Flusswasser aus der Limmat betrieben. Bereits 1937 wurde diese Wärmepumpe eingebaut und arbeitete bis zur Erneuerung im Jahr 2001 ohne Probleme (vgl. Kapitel 5.3). In der jüngsten Vergangenheit gibt es nun wieder vereinzelte Forschungs- und Untersuchungsansätze, um Oberflächengewässer möglicherweise vermehrt thermisch zu nutzen. So wurden Patente

Einleitung

für Konstruktionen zur thermischen Oberflächenwassernutzung von Max Loidl angemeldet, eine serienreife Anlagenkonstruktion im niedrigen Leistungsbereich von der Firma FRANK GmbH entwickelt sowie ein Forschungsprojekt mit einem gesamtumweltfreundlichen, schwimmenden Haus in Kalkar in Nordrhein-Westfalen verwirklicht, das die Wärmeenergie aus dem Kiesbaggersee Birgelfeld nutzt.

2. Überblick über die Arbeit und Zielsetzung

In dieser Arbeit soll erörtert werden, welche Potentiale zur thermischen Nutzung der Hauptgewässer in Baden-Württemberg zu erwarten sind. Dies soll anhand von Berechnungen der potentiellen Entzugsleistungen und einer Darstellung in verschiedenen Potentialkarten belegt werden. Anhand von zwei gewählten Flussabschnitten sollen beispielhaft die Eigenschaften bzgl. ihres thermischen Potentials betrachtet werden. Diese Ergebnisse könnten für zukünftige Planungen oder als Vergleich für Gewässer mit ähnlichen Eigenschaften verwendet werden. Weiterhin soll untersucht werden, welche Anforderungen an das Gewässer als auch technische und ökonomische Anforderungen an die WP-Anlage gestellt werden müssen, um eine ökologisch vertretbare Umsetzung zu gewährleisten. Dafür soll auch die Rechtslage für die thermische Nutzung von Oberflächenwasser dargelegt sowie bereits existierende Anlagen als Praxisbeispiele beschrieben werden.

3. Systeme zur thermischen Nutzung von Oberflächengewässern und technische Anforderungen

3.1 Allgemeine technische Informationen

Zu Beginn sollen einige rein technische Informationen zur thermischen Nutzung von Oberflächengewässern mittels einer WP dargestellt werden. Zuerst soll nur vom Heizfall ausgegangen werden, der Kühlfall wird später noch genauer erklärt. Grundsätzlich soll eine Wärmeübertragung von einem Umweltmedium, in diesem Fall Oberflächenwasser, auf Heizwasser erfolgen, das dann ein höheres Temperaturniveau erreicht. Da eine direkte Wärmeübertragung aufgrund zu niedriger Oberflächenwassertemperaturen nicht möglich ist, muss eine WP verwendet werden, um das Heiz- und Warmwasser auf ein ausreichend hohes Temperaturniveau bringen zu können. Die Funktionsweise einer WP kann anhand des Schemas in Abbildung 1 erläutert werden.

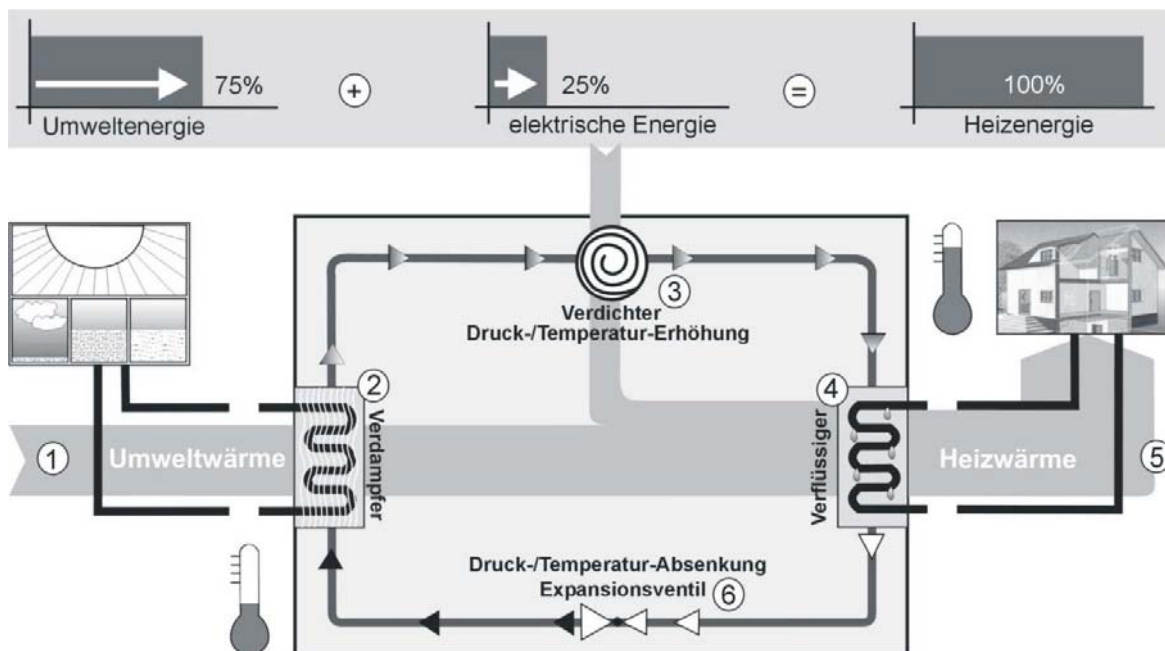


Abbildung 1: Schema einer Wärmepumpenanlage (Quelle: THOLEN & WALKER-HERTKORN, 2007)

Bei ① wird die Umweltwärme, in diesem Fall Wärme aus Oberflächengewässern, auf eine Wärmeträgerflüssigkeit übertragen. Hierbei spricht man vom Wärmequellenkreislauf oder Primärkreislauf. Als Wärmeträgerflüssigkeit wird normalerweise Sole verwendet. Wenn sichergestellt werden kann, dass die Wärmequellentemperaturen immer über dem Gefrierpunkt liegen, könnte auch reines Wasser verwendet werden. Dann wird bei ② die Wärmeträgerflüssigkeit an dem Verdampfer vorbeigeleitet, sodass die Wärmeenergie auf das Kältemittel übertragen wird und dieses dabei verdampft. Der Verdichter saugt bei ③ den Dampf an und komprimiert diesen, wodurch aufgrund des erhöhten Drucks die Temperatur des Kältemitteldampfes steigt. Beim Schritt ④ wird das Kältemittel wieder verflüssigt. Dies ist dadurch bedingt, dass das im Gegensatz zum Kältemittel kältere Heizungswasser am sog. Verflüssiger (Kondensator) vorbeiströmt und die Wärme dadurch auf das Heizungswasser übertragen wird. Das Kältemittel kondensiert und die Temperatur des Heizwassers steigt. Das Heizwasser wird dann im Heizungskreislauf, dem sog. Sekundärkreislauf genutzt und mit niedrigerer Temperatur wieder dem Verflüssiger zugeführt, wie bei ⑤ dargestellt. Bevor der Kreislauf wieder von Neuem beginnt, wird bei ⑥ mittels eines Expansionsmittels Druck von dem Kältemittel genommen, sodass sich dieses weiter abkühlt. Wenn die Temperatur niedrig genug ist, wird das Kältemittel wieder in den Verdampfer geschickt und der Kreislauf startet erneut. Je nach Anlagengröße und Anwendungsbereich gibt es verschiedene Kältemittel, die unterschiedliche physikalische Eigenschaften besitzen, wobei am häufigsten die Kältemittel R134A, R407C oder R290 verwendet werden.

Die Übertragung und damit die Nutzung der Umweltwärme kann auf verschiedene Arten erfolgen. Für die spezielle thermische Nutzung von Oberflächengewässern kommen zwei verschiedene Systeme in Betracht. Diese sind:

- offenes System ohne Zwischenkreislauf
- geschlossenes System ohne Zwischenkreislauf

Bei einem offenen System wird dem Gewässer tatsächlich Wasser entnommen, benutzt und dem Gewässer wieder zugeführt. Hingegen beim geschlossenen System erfolgt der Wärmeübertrag im Gewässer mittels eines separaten Wärmetauschers, sodass kein Wasser entnommen werden muss. Wie ein offenes oder ein geschlossenes System

konzipiert werden kann, welchen Nutzen ein Zwischenkreislauf hat und welche Ausführungsmöglichkeiten es bereits gibt, wird in den nächsten beiden Kapiteln erläutert.

In Abbildung 2 ist dargestellt, wie der Gesamtaufbau einer WP-Anlage bei einem offenen System aussieht. Dabei wird das aus dem Oberflächengewässer entnommene Wasser direkt am Verdampfer vorbeigeführt und bewirkt die Verdampfung des Kältemittels. Anschließend läuft der Kältemittelkreislauf wie bereits beschrieben ab. Die Einsatzgrenzen der WP liegt dabei bei einer Oberflächenwassertemperatur von 7 bis 25 °C (Quelle: WEISHAUPT, 2007) und 8 bis 22 °C (Quelle: OCHSNER, 2010). Der Grund für diese Einschränkungen liegt in der Vermeidung von Vereisungen am Verdampfer. Wie aus den Beschriftungen für einen Beispielkreislauf in Abbildung 2 ersichtlich ist, hat das verwendete Kältemittel R290 bei Ankunft am Verdampfer eine Temperatur von -8 °C und erwärmt sich auf - 3 °C. Genau umgekehrt verhält es sich mit der Temperatur des entnommenen Oberflächenwassers. Diese sinkt von 10 °C auf 5 °C, es liegt also eine Temperaturspreizung von 5 K vor. Wäre die Eintrittstemperatur des Oberflächenwassers bei einer identischen Temperaturspreizung geringer, bspw. 4 °C, dann läge die Ausgangstemperatur bei - 1 °C. Bei dieser Konstellation würde das vorbeiströmende Wasser langsam am Verdampfer gefrieren und die Leistungsfähigkeit verringern bzw. einen Ausfall der WP-Anlage verursachen.

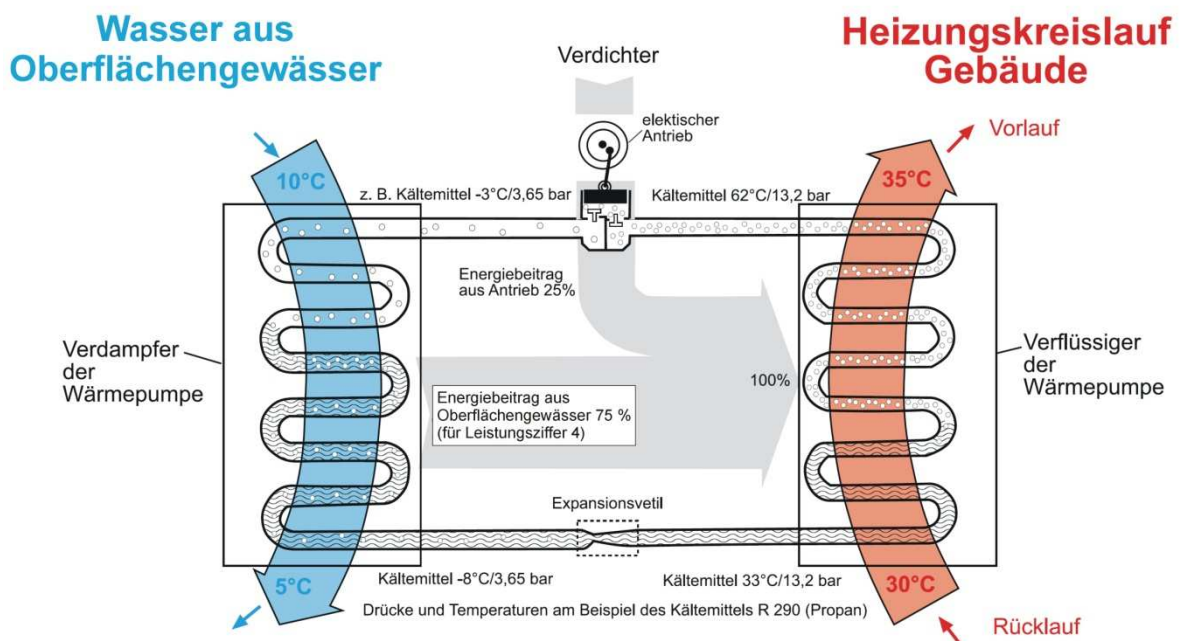


Abbildung 2: Schema eines offenen Systems ohne Zwischenkreislauf (verändert nach: UM, 2009)

Bei einem offenen System kann aufgrund genehmigungsrechtlicher Auflagen oder aus Gründen der Betriebssicherheit ein Zwischenkreislauf vorgesehen werden. Der Aufbau einer solchen Anlage ist in Abbildung 3 zu sehen. Hier wird das Oberflächenwasser entnommen und an einem Wärmetauscher vorbeigeführt und damit die Wärmeenergie auf das Wärmeträgermedium, ein Wasser-Glykol-Gemisch, übertragen. Dann fließt diese Wärmeträgerflüssigkeit in einem separaten Kreislauf an einem weiteren Wärmetauscher am Verdampfer vorbei und ermöglicht die Verdampfung des Kältemittels.

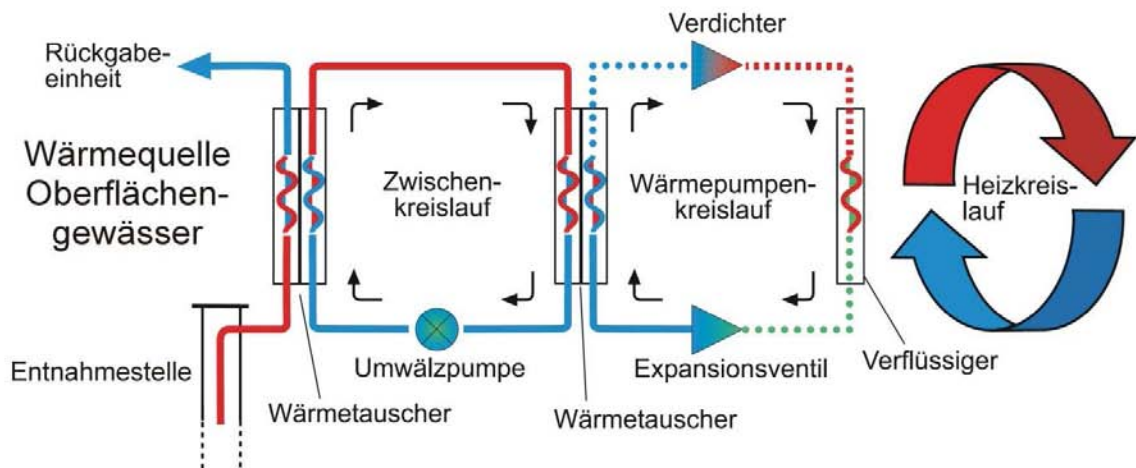


Abbildung 3: Schema eines offenen Systems mit Zwischenkreislauf (Quelle: UM, 2009)

Bei dieser Methode ist eine höhere Betriebssicherheit gegeben, d.h. es kommt im Wärmeträgerkreislauf aufgrund des Frostschutzzusatzes in der Sole zu keinen Vereisungen und damit zu keinen Beschädigungen des Verdampfers. Bei möglichen Verunreinigungen, die auftreten können, wenn der Kältemittelkreislauf beschädigt wird und Kältemittel austritt, kann der Schutz der Gewässerökologie mit einem Zwischenkreislauf ebenfalls besser gewährleistet werden. Es können auch automatische Überwachungsinstrumente installiert werden, die dann den Kreislauf stoppen und die im Kreislauf verbleibende Wärmeträgerflüssigkeit absaugen, falls der Wärmeträgerkreislauf eine Leckage aufweisen würde. Jedoch verliert die Anlage durch den zusätzlichen Wärmetauscher einen gewissen Anteil der Energie. Pro Wärmeübertrag verringert sich die Mediumtemperatur um ca. 2 K, wodurch die Effizienz der WP-Anlage verringert wird.

Beim geschlossenen System ist der Wärmetauscher direkt in das Oberflächengewässer eingebaut. Darin zirkuliert das Wärmeträgermedium, nimmt die Wärmeenergie auf und strömt dann mit einer ausreichend hohen Temperatur am Verdampfer vorbei und bringt das

Kältemittel zum Verdampfen. Das Wärmeträgermedium kann dabei, je nach behördlichen Vorgaben, Wasser oder eine Wasser-Glykol-Mischung sein.

Wenn reines Wasser als Wärmeträgerflüssigkeit von behördlicher Seite vorgeschrieben ist, sollte auch beim geschlossenen System ein Zwischenkreislauf eingebaut werden. Der Grund liegt wieder bei der Gefahr der Vereisung am Verdampfer. Im Zwischenkreislauf müsste dann wieder ein Wasser-Glykol-Gemisch verwendet werden, um eine Vereisung auszuschließen.

Beim Einsatz der WP zu Kühlzwecken ist zwischen einer passiven und aktiven Kühlung zu unterscheiden. Bei der aktiven Kühlung wird die Funktionsweise der WP im Vergleich zum Heizen genau umgekehrt, d.h. der Verdampfer und der Kondensator werden getauscht. Das bedeutet, dass das Kühlwasser zunächst am Verdampfer vorbeigeführt werden muss, um die Wärme aus dem Gebäude auf das Kältemittel zu übergeben. Das Kältemittel verdampft, wird komprimiert, besitzt dadurch eine höhere Temperatur und gibt am Kondensator die Wärme an das vorbeiströmende Oberflächenwasser ab. Der Vorgang mit plausiblen Temperaturangaben ist in Abbildung 4 dargestellt.

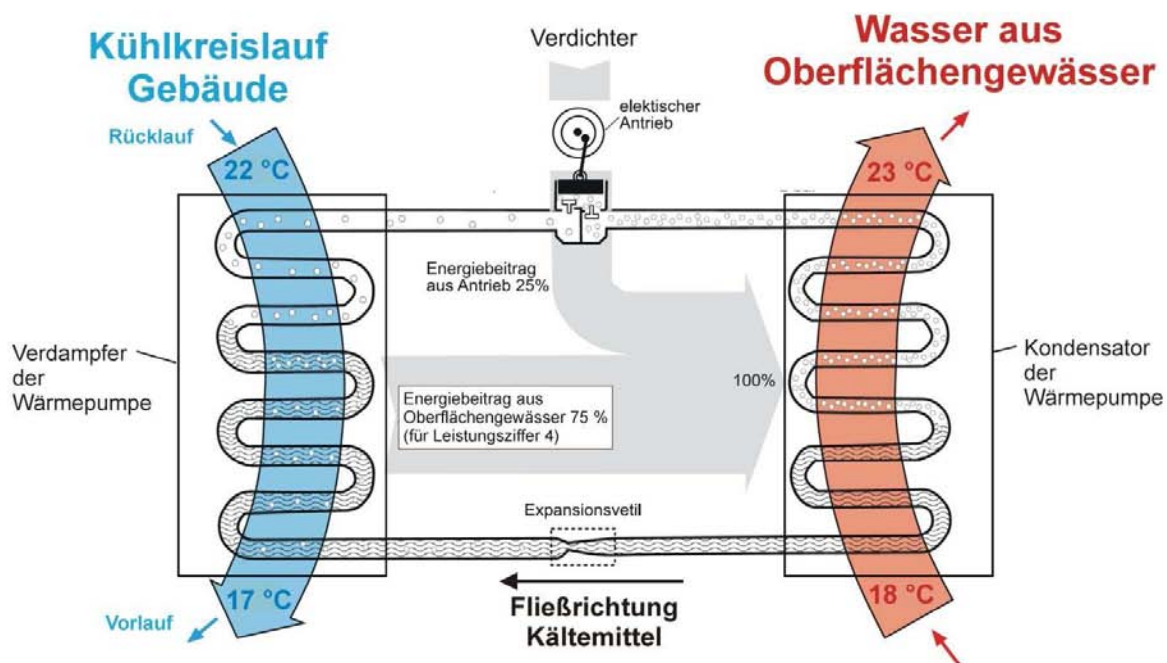


Abbildung 4: Schema zur aktiven Kühlung mit einem offenen System ohne Zwischenkreislauf (verändert nach: UM, 2009)

Wenn es die Temperaturen des Oberflächengewässers zulassen, kann auch eine rein passive Kühlung angewendet werden. Dabei kommt es auf die Gebäudeanforderungen und die Oberflächenwassertemperatur an. Wenn im Gebäude eine Kühlwassertemperatur von 17 °C benötigt wird, das Gewässer aber bereits Temperaturen von mehr als 15 °C aufweist, ist eine passive Kühlung nicht effizient. Bei der passiven Kühlung wird die WP nicht benötigt und die Wärmeübertragung erfolgt direkt vom Kühlwasser auf das Oberflächengewässer, d.h. das Kühlwasser wird in einem Wärmetauscher direkt am entnommenen Oberflächenwasser vorbeigeleitet. Technisch ist die passive Kühlung mit Hilfe eines 3-Wege-Ventiles einfach zu lösen. Die genaue technische Ausführung soll hier aber nicht weiter erörtert werden.

3.2 Systemvarianten für das geschlossene System

Ein genehmigungsrechtlicher Vorteil des geschlossenen Systems ist, dass keine Benutzung im Sinne von §9 Wasserhaushaltsgesetz (WHG) vorliegt, d.h. es wird kein Wasser aus dem Gewässer direkt entnommen, da der Wärmeaustausch im Gewässer stattfindet. Somit wäre die Erteilung einer Genehmigung einfacher zu erreichen. Welche rechtlichen Anforderungen an eine Anlage zur thermischen Nutzung von Oberflächengewässern gestellt werden, wird in Abschnitt 4 noch genauer erläutert. Im Folgenden sollen zwei mögliche Anwendungsbeispiele für ein geschlossenes System näher betrachtet werden.

3.2.1 maxloidverfahren

Das maxloidverfahren ist eine patentierte Möglichkeit, Oberflächengewässer thermisch zu nutzen. Dafür wurden zwei verschiedene Bauausführungen entwickelt, eine zur Benutzung in Flüssen und eine zur Benutzung in Seen. Beide Ausführungen können sowohl zum Heizen als auch zum Kühlen verwendet werden. Bisher gibt es keine ausgeführten Anlagen nach diesem Ansatz, technisch sind jedoch Entzugsleistungen mit mehreren 100 kW vorstellbar (LOIDL, 2012).

3.2.1.1 Anwendung in Flüssen

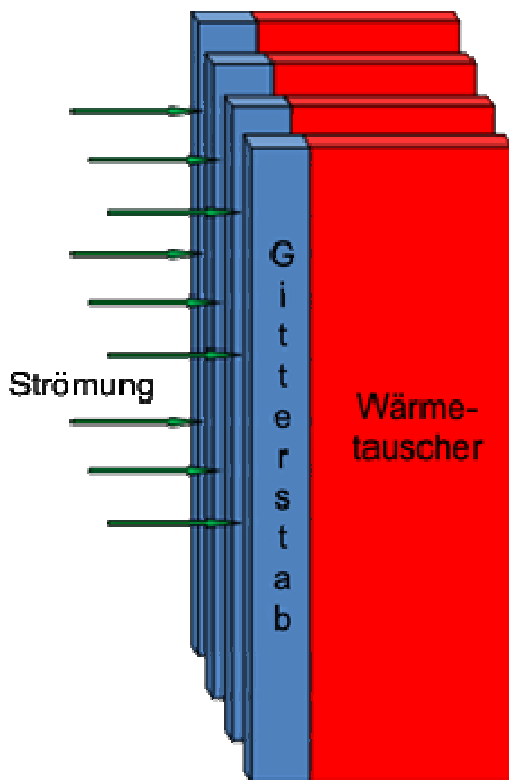


Abbildung 5: Anordnung der länglichen Wärmetauscher hinter Gitterstäben (Quelle: www.maxloidlverfahren.de)

Dieses Verfahren wurde grundsätzlich so konzipiert, dass hinter Schutzvorrichtungen, den sog. Rechen, wie sie vor dem Turbineneinlauf von Wasserkraftwerken vorhanden sind, Wärmetauscherrohre angebracht werden. Das vorbeifließende Wasser gibt dabei seine Wärmeenergie an das innerhalb des Wärmetauschers zirkulierende Wärmeträger-medium ab. Das Wärmeträgermedium fließt dann zu einer zentralen WP oder kann in einem kalten Nahwärmenetz genutzt werden. Ohne die Schutzvorrichtung bestünde die Gefahr der Beschädigung der Wärmetauscher durch Geröll und Treibgut. Diese länglichen

Wärmetauscher können auch an bereits bestehende Bauwerke angebracht werden. Abbildung 5 zeigt eine Kombination von schützenden Gitterstäben und

Wärmetauschern. Durch die in Fließrichtung angebrachte Konstruktion wird das ursprüngliche Fließverhalten nicht beeinträchtigt und somit besteht kein Einfluss auf die Produktivität des Wasserkraftwerks. Auch die Installation kann relativ einfach vorgenommen werden, da der Bereich hinter den Schutzvorrichtungen normalerweise mit Dammbalken bzw. Dammtafeln abgesperrt werden kann. Damit könnten die Wärmetauscher im Trockenen ohne Probleme angebracht werden. Was auch für diese Methode spricht ist der Umstand, dass bei Wasserkraftwerken immer eine große bis sehr große Wassermenge vorhanden ist, welche die Wärmetauscher umfließt. Dadurch kann über einen erhöhten Durchfluss eine insgesamt höhere Wärme- bzw. Kälteentzugsleistung erzielt werden (LOIDL, 2012).

3.2.1.2 Anwendung in Seen

Bei der Variante für ein stehendes Gewässer, also einen See, ist ein anderes System möglich. Hierbei wird eine durch Auftriebskörper im Wasser schwebendes Rohr, das am unteren Ende mit einem Gitter versehen ist, mit einem kleineren Innenrohr in das Gewässer eingebracht. Das Gitter soll Verschmutzungen verhindern. Zwischen Innen- und Außenrohr sind lamellenartige Wärmetauscherelemente angebracht. Vom Innenrohr, das

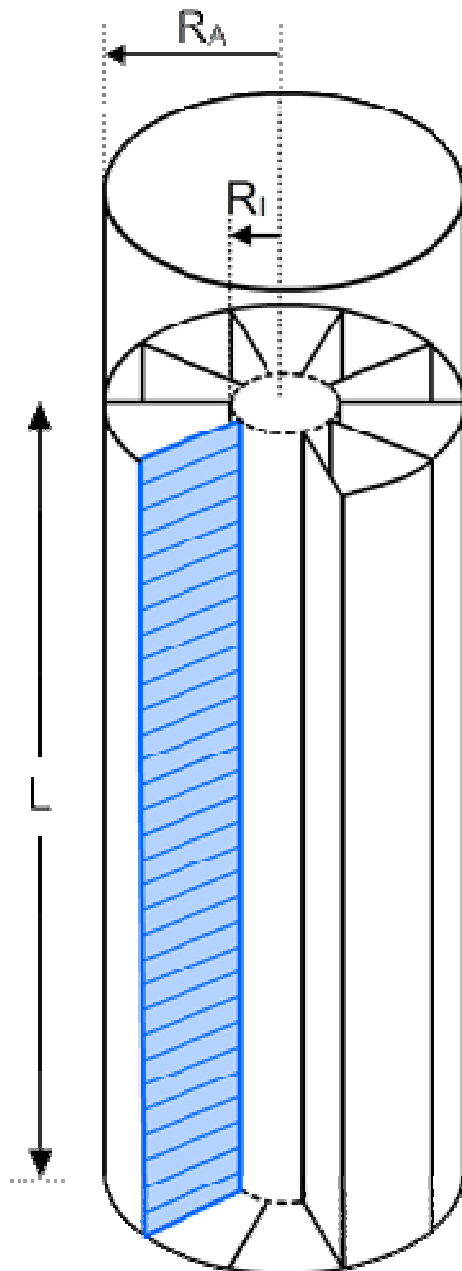


Abbildung 6: Konstruktion zur Verwendung in Seen (Quelle: www.maxloidlverfahren.de)

über Rohrleitungen von Uferbauwerken mit Wärmeträgerflüssigkeit gespeist wird, zirkuliert diese Flüssigkeit durch die Wärmetauscherelemente. Nach kompletter Durchströmung des Wärmetauschers fließt die Wärmeträgerflüssigkeit mit einer erhöhten bzw. erniedrigten Temperatur durch das Innenrohr wieder zurück zu einer WP oder einem kalten Nahwärmenetz. In Abbildung 6 ist diese Konstruktion mit blau markierten Wärmetauscherelementen schematisch dargestellt. Das Rohr muss dabei bis zur Wasseroberfläche reichen. Dabei macht man sich eine besondere Eigenschaft des Wassers zu nutzen. Wasser besitzt bei einer Temperatur von $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ die höchste Dichte und sinkt somit im Vergleich zu Wasser mit anderen Temperaturen ab. Wenn man davon ausgeht, dass der See im Winter oberflächennah zufriert, ist ab einer ausreichenden Tiefe immer noch eine Wassertemperatur von mindestens $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ vorhanden. Daher muss die Rohrlänge ausreichend lang gewählt werden, um Wasser aus diesem Bereich zu nutzen. Ebenso muss der Durchmesser des Rohres genügend groß sein. In einem Beispiel wird vom Patentinhaber von 10 m

Länge, einem Außenrohrdurchmesser von 3,5 m und einem Innenrohrdurchmesser von 1,0 m ausgegangen. Um das Wasser nun thermisch zu nutzen, pumpt man oberflächlich Wasser aus dem Inneren des Rohres und leitet es außerhalb des Rohres wieder in das Gewässer. Aufgrund des größeren hydrostatischen Drucks des 4 °C warmen Wassers strömt das Wasser von unten nach oben nach, wenn die obere Wasserschicht im Rohr permanent abgepumpt wird. Abbildung 7 stellt diesen Vorgang schematisch dar. Ein Vorteil dieser Anordnung ist, dass nur eine geringe Pumpenleistung nötig ist, da nur eine sehr geringe Hubhöhe überwunden werden muss und nicht die gesamte Rohrlänge (LOIDL, 2012).

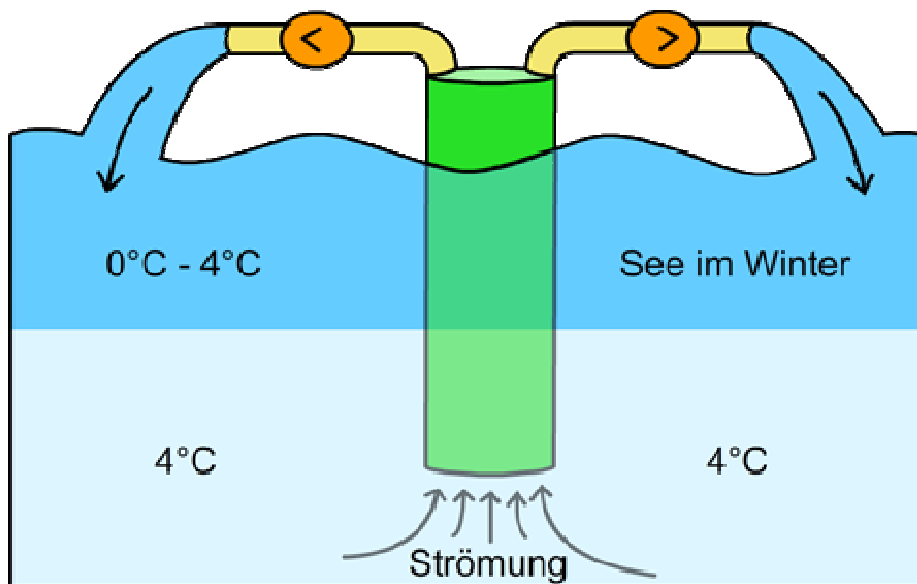


Abbildung 7: Schema zur Funktionsweise des maxloidverfahren in einem See (Quelle: www.maxloidverfahren.de)

3.2.2 LIMNION LIMA-1

Ein weiteres Beispiel für ein geschlossenes System, mit dem auch Gebäude mit geringerem Wärmebedarf versorgt werden können, ist der LIMNION LIMA-1. Dieser

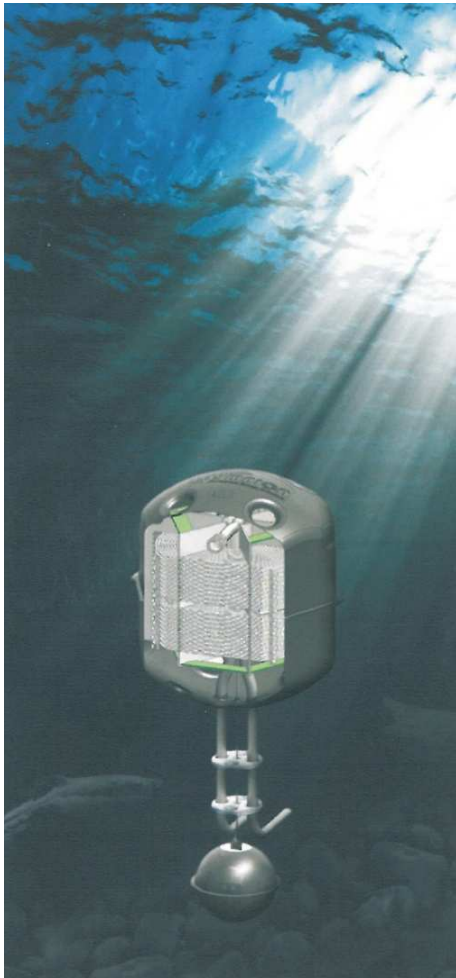


Abbildung 8: LIMNION LIMA-1
(Quelle: FRANK GmbH
Produktbroschüre)

kann in Seen oder auch Flüssen verwendet werden. Nach Herstellerangaben sind im Winterbetrieb durchschnittlich 6 bis 12 kW und in den Übergangszeiten bis zu 15 kW Wärmeentzugsleistung möglich. Bei dieser Konstruktion ist der Wärmetauscher in ein Polyethylengehäuse eingebaut, in dem durch Konvektionsöffnungen die Strömungsführung geleitet werden kann. Die Zirkulation durch das Gehäuse erfolgt dabei rein aufgrund von Temperatur- und damit Dichteunterschieden im Gewässer. Eine Beispielskizze des LIMNION LIMA-1 ist in Abbildung 8 zu sehen. Die Maße des LIMNION LIMA-1 betragen 1070 mm x 1120 mm (Breite x Höhe). Mittels Polyethylen-Rohren wird dann eine Verbindung vom Wärmetauscher im Gewässer zur Wärmepumpe im Gebäude hergestellt, in der das Wärmeträgermedium (normalerweise Wasser mit einem Frostschutzzusatz) zirkuliert. Das Wasser/Frostschutz-Gemisch wird direkt durch den Verdampfer gepumpt und bringt das vorbeiströmende Kältemittel zum verdampfen. Durch die kleine und

kompakte Form des LIMNION LIMA-1 kann die Installation einfach von statten gehen. Von einem Boot oder einem Steg aus wird der LIMNION LIMA-1 mit Hilfe eines Gewichts im Gewässer versenkt. Bei Vorhandensein eines Bootsstegs kann er auch alternativ mit Verankerungen an diesem befestigt werden. Diese beiden Einbaumethoden sind in Abbildung 9 dargestellt (FRANK GmbH Produktbroschüre, 2012; LUGERT, 2012).

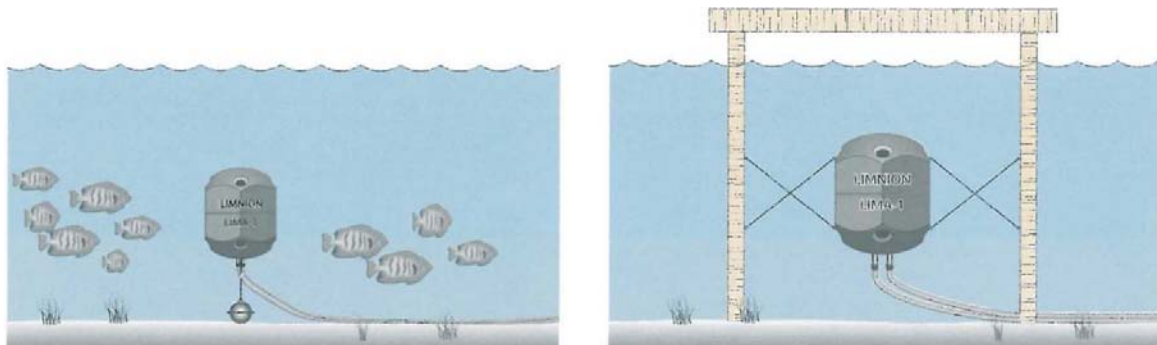


Abbildung 9: Installationsvarianten des LIMNION LIMA-1: links mit Gewicht; rechts befestigt an Bootssteg (Quelle: FRANK GmbH Produktbroschüre)

Falls eine größere Wärmeentzugsleistung benötigt wird, können auch mehrere LIMNION LIMA-1 „in parallelen Kreisläufen angeschlossen werden. Die Zusammenführung der einzelnen Kreise erfolgt dann über einen Verteilerschacht“ (Quelle: FRANK GmbH Produktbroschüre, 2012). Dies ist schematisch in Abbildung 10 dargestellt.

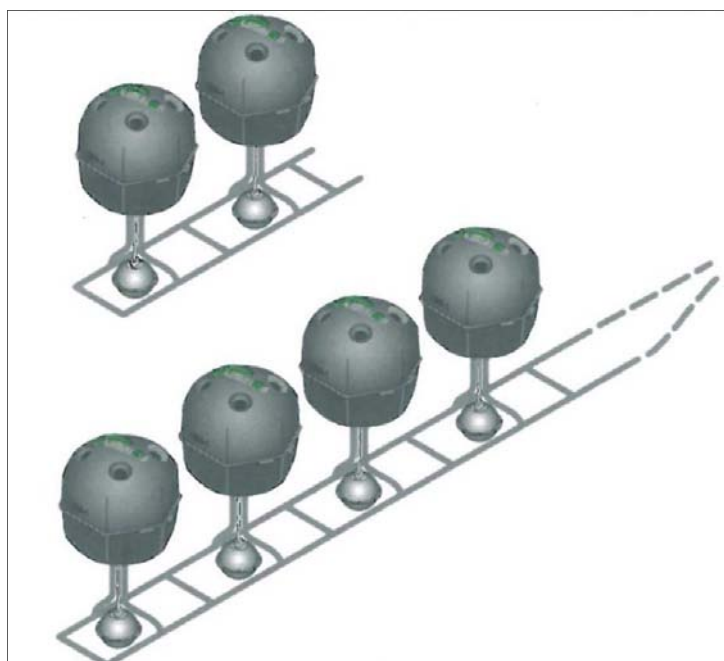


Abbildung 10: Parallelschaltung des LIMNION LIMA-1 (Quelle: FRANK GmbH Produktbroschüre)

3.3 Systemvariante für das offene System

Ein offenes System bedingt teilweise einen größeren baulichen Aufwand als ein geschlossenes System. Dafür wird aus einem Oberflächengewässer in einer Rohrleitung Wasser entzogen und über einen Filter und ähnliche Säuberungsmechanismen geleitet. Dann wird das entnommene Oberflächenwasser direkt der WP bzw. dem Verdampfer zugeführt. Es wäre auch denkbar, dass vor dem Verdampfer noch ein Zwischenkreislauf eingebaut wird. Eine solche Anordnung wurde aber noch in keiner bekannten Anlage realisiert. Der WP-Kreislauf läuft anschließend wie bereits beschrieben ab. Die beiden Anwendungsmöglichkeiten sind bereits in Abschnitt 3.1 in der Theorie beschrieben worden. In der Praxis gibt es einige Beispiele für ein offenes System ohne Zwischenkreislauf, die in Abschnitt 5 näher betrachtet werden.

4. Gesetzeslage zur thermischen Nutzung von Oberflächengewässern

4.1 Die europäische Wasserrahmenrichtlinie (WRRL)

Zu Beginn soll die rechtliche Lage in Bezug auf die thermische Nutzung von Oberflächengewässern betrachtet werden. Grundsätzlich ist die oberste Richtlinie in Bezug auf Wasser in Europa die europäische Wasserrahmenrichtlinie (WRRL). Der rechtliche Aufbau in Deutschland und der Einfluss der WRRL ist schematisch in Abbildung 11 dargestellt.



Abbildung 11: Aufbau der Rechtsordnung im Bereich Wasser
(Quelle: HÄHNLEIN et al., 2011)

In der Überschrift der WRRL heißt es: „Richtlinie 2000/60/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik“, d.h. diese Richtlinie ist für alle möglichen Sachverhalte zuständig, die mit Wasser generell zu tun haben. Die WRRL gibt für alle Mitgliedsstaaten der europäischen Union das Ziel vor, die europäischen Gewässer sauber und damit qualitativ möglichst hochwertig zu halten. Die einzeln definierten Umweltziele sind hierbei für Oberflächengewässer „eine

Verschlechterung des Zustands aller Oberflächenwasserkörper zu verhindern“, „*einen guten Zustand der Oberflächengewässer*“ sowie „*ein gutes ökologisches Potential und einen guten chemischen Zustand der Oberflächengewässer zu erreichen*“ (WRRL, 2000). Wesentlicher Aspekt bei der Erfüllung dieser Ziele ist es, die Verschmutzung durch prioritäre Stoffe zu reduzieren bzw. „*die Einleitungen, Emissionen und Verluste prioritärer gefährlicher Stoffe zu beenden oder schrittweise einzustellen*“ (WRRL, 2000). Als Zeitrahmen, um diese Ziele zu erfüllen, sind 15 Jahre vorgegeben. Falls die Umweltziele nicht eingehalten werden, besteht die Möglichkeit, dass die Mitgliedsstaaten Sanktionen auferlegen, die „*wirksam, angemessen und abschreckend sein*“ sollen (WRRL, 2000). Zu Grenzwerten des Wassertemperaturregimes in Oberflächengewässern gibt es in der WRRL keine expliziten Angaben. Lediglich in Anhang V in Punkt 1.1.1 sowie Punkt 1.1.2 werden die Temperaturverhältnisse als einer von mehreren Qualitätskomponenten für die Bestimmung des ökologischen Zustands von Flüssen und Seen angegeben. Diese Qualitätskomponenten sind in Anhang V in den Punkten 1.2.1 und 1.2.2 in den Begriffsbestimmungen näher erläutert. Als Kriterium für die Beurteilung der Wassertemperatur wird lediglich angegeben, ob es Anzeichen anthropogener Störungen gibt. Falls anthropogene Störungen vorliegen, muss geklärt werden, ob trotzdem „*die Funktionsfähigkeit des typspezifischen Ökosystems und die Einhaltung der [...] Werte für die biologischen Qualitätskomponenten gewährleistet sind*“ (WRRL, 2000). Je nach Ergebnis wird dann der Zustand des Oberflächengewässers beurteilt.

Generell ist die WRRL ein gutes Werkzeug, um eine gleichmäßige Verpflichtung aller Staaten zu gewährleisten, die Gewässer rein zu halten. Damit wird verhindert, dass flussabwärts liegende Staaten nur Zugang zu verschmutztem bzw. qualitativ minderwertigem Wasser haben und damit eine Benachteiligung von einzelnen Staaten ausgeschlossen werden kann. Für die thermische Nutzung von Oberflächengewässern lassen sich keine klaren Vorgaben ableiten.

4.2 Das Wasserhaushaltsgesetz (WHG)

Die Vorgaben der WRRL sollten bis zum 22. Dezember 2003 in nationales Recht umgesetzt werden. Dies geschah in Deutschland mit der Novellierung des Wasserhaushaltsgesetzes (WHG) im Sommer 2002, in der „*nur die wesentlichen Grundsätze der Richtlinie übernommen*“ wurden (Quelle: BMU, 2012). Weiterhin

ergingen dabei Regelungsaufträge an die Länder, die die Vorgaben des WHG in die jeweiligen Landeswassergesetze integrieren mussten. Die letzte komplette Neufassung des WHG datiert vom 31. Juli 2009. Darin sind Bestimmungen enthalten, die bereits direkt für die allgemeine Nutzung von Wasser (Oberflächen- oder Grundwasser) zuständig sind. Anfangs werden allgemeine Begriffsdefinitionen sowie Gewässerbewirtschaftungsgrundsätze angegeben. Dabei werden die Vorgaben aus der WRRL wieder aufgegriffen wie z.B. eine nachhaltige Bewirtschaftung zu erreichen. Hierbei sind die Gewässer insbesondere als Lebensraum für Tiere und Pflanzen zu erhalten, jede Beeinträchtigung des Wasserhaushalts zu vermeiden und generell möglichst naturnahe Verhältnisse zu gestalten. Von größerer Bedeutung für den Genehmigungsvorgang einer Anlage zur thermischen Nutzung von Oberflächengewässern sind §8 bis §10 WHG. Nach §8 WHG ist zur Benutzung eines Gewässers eine Erlaubnis bzw. eine Bewilligung erforderlich, soweit nicht Gefahren der öffentlichen Sicherheit oder ähnliche Extremereignisse vorliegen. Benutzungen sind nach §9 WHG Abs. 1 „*das Entnehmen und Ableiten von Wasser*“ und „*das Aufstauen und Absenken*“ (WHG, 2012), bezogen auf Oberflächengewässer. Es gibt noch andere Formen der Benutzung, die aber für die thermische Nutzung von Oberflächengewässern nicht relevant sind. Inhaltlich unterscheiden sich Erlaubnis und Bewilligung nach §10 WHG Abs. 1 folgendermaßen: „*die Erlaubnis gewährt die Befugnis, die Bewilligung das Recht, ein Gewässer zu einem bestimmten Zweck in einer nach Art und Maß bestimmten Weise zu benutzen*“ (WHG, 2012). Praktisch wird mittlerweile hauptsächlich nur noch eine zeitlich begrenzte Erlaubnis ausgestellt, da diese jederzeit von der zuständigen Wasserbehörde mit einer ausreichenden Begründung widerrufen werden kann. Dies kann für die Wasserbehörde Vorteile bringen, falls sich etwas Unvorhersehbares ereignet und schnell gehandelt werden muss. Im Gegensatz dazu ist die Bewilligung von Art. 14 GG geschützt und hat einen eigentumsrechtlichen Charakter. Die Bewilligung wird nach §14 WHG für eine bestimmte Zeit erteilt, meist 30 Jahre, teilweise aber auch länger. Hier kann die zuständige Wasserbehörde die Bewilligung ebenfalls entziehen, jedoch sind spezielle Voraussetzungen notwendig, die in §18 WHG beschrieben sind. Die §27 und §33 behandeln noch einmal explizit die Forderung nach einer möglichst naturnahen Benutzung und der Erhaltung bzw. Erreichung eines guten ökologischen und chemischen Zustands der Gewässer, wie es auch in der WRRL gefordert wird. Beim Aufstauen oder Entnehmen bzw. Ableiten von Wasser aus einem Oberflächengewässer ist nach §33 darauf zu achten, dass die Abflussmenge gleich bleibt, d.h. dass die Forderung aus der WRRL nach einem

mengenmäßig ausgeglichenem Wasserhaushalt erfüllt wird. Bei der Bewirtschaftung eines Gewässers sind für den Eigentümer bzw. Betreiber auch besondere Pflichten zur Gewässerunterhaltung zu erfüllen (§41 WHG, 2012). In Wasserschutzgebieten gelten spezielle Anforderungen, sodass in diesen Gebieten und auch in angrenzenden Gebieten seitens der Wasserbehörde besondere Auflagen ausgestellt werden können. Diese sind in §52 WHG beschrieben und können beispielsweise eine Einschränkung der Nutzung, eine besondere Überwachung des Gewässers, des Bodens und der Schutzbestimmungen oder Bepflanzungen und Aufforstungen beinhalten. Ein weiterer Punkt, der für das Betreiben einer Anlage zur Gewinnung thermischer Energie aus einem Fließgewässer von Bedeutung ist, wird in § 62 WHG behandelt, der Umgang mit wassergefährdenden Stoffen. Dabei wird gefordert, dass bei Verwendung von wassergefährdenden Stoffen in Rohrleitungsanlagen die Anlage so zu konstruieren und zu betreiben ist, dass keine negative Veränderung des Oberflächengewässers zu befürchten ist. In Wärmepumpenanlagen werden größtenteils Frostschutzzusätze in den Wärmeträgerkreislauf zugegeben und im Kältekreislauf ein Kältemittel mit niedriger Siedetemperatur verwendet. Diese chemischen Stoffe und deren Umgang werden in der Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (VAUwS) beschrieben, worauf im Folgenden eingegangen werden soll.

Der aktuell veröffentlichte Entwurf der VAUwS datiert vom 27.01.2012. Während der Anfertigung dieser Arbeit wurde gleichzeitig eine Neufassung vom Bundesumweltministerium bearbeitet. Diese ist aber noch nicht veröffentlicht, weshalb auf die Entwurfsfassung vom 27.01.2012 eingegangen werden soll. Für eine Anlage mit dem konkreten Fall einer thermischen Nutzung von Oberflächengewässern, bei dem der Wärmetauscher in einem geschlossenen System direkt in das Gewässer eingebaut ist, gibt es keine gesetzlichen Vorgaben. Diesem Fall am nächsten kommt §35: Besondere Anforderungen an Erdwärmesonden und –kollektoren, Solarkollektoren und Kälteanlagen. Dabei wird aber von Wärmeträgerkreisläufen mit wassergefährdenden Stoffen ausgegangen, die unterirdisch eingebaut werden. Die Leitungen, in denen das Wärmeträgerfluid zirkuliert dürfen nur dann einwandig eingebaut werden, wenn die Bauteile alle werksgeschweißt sind, automatische Fehlermelde- und Abschaltungsanlagen vorhanden sind und entweder ein nicht wassergefährdender Stoff oder ein Gemisch der Wassergefährdungsklasse 1 verwendet wird. Abbildung 12 zeigt, welche Gefährdungsstufen bei einer Gesamtanlage mit Stoffen unterschiedlicher

Wassergefährdungsklasse bei verschiedenen Stoffvolumina erreicht werden. Dabei ist anzumerken, dass eine herkömmliche Wärmepumpenanlage normalerweise keine Gefährdungsstufe größer als Stufe A, also „*schwach wassergefährdend*“ (VAUwS, 2012), erreicht. Dies liegt daran, dass das verwendete Stoffvolumen nicht größer als 10 m³ bzw. 10000 l ist und die verwendeten Frostschutzmittel und Kältemittel eine Wassergefährdungsklasse 1 besitzen. Ebenso liegt bei einer Oberflächenwassernutzung das Stoffvolumen der wassergefährdenden Stoffe nicht in dieser Größenordnung, sondern weit darunter. Generell können aus der VAUwS keine konkreten genehmigungsrechtlichen Vorgaben für Anlagen mit Oberflächenwassernutzung abgeleitet werden.

Ermittlung der Gefährdungsstufen	Wassergefährdungsklasse (WGK)		
	1	2	3
Volumen in Kubikmeter oder Masse in Tonnen			
≤ 0,22 oder 0,2	Stufe A	Stufe A	Stufe A
> 0,22 oder 0,2 ≤ 1	Stufe A	Stufe A	Stufe B
> 1 ≤ 10	Stufe A	Stufe B	Stufe C
> 10 ≤ 100	Stufe B	Stufe C	Stufe D
> 100 ≤ 1 000	Stufe B	Stufe D	Stufe D
> 1 000	Stufe C	Stufe D	Stufe D

Abbildung 12: Einteilung der Wassergefährdungsklassen nach der VAUwS (Quelle: VAUwS, 2011)

Wie bereits erwähnt, ist das WHG das übergeordnete Gesetz, an dem sich die einzelnen Bundesländer bei der Formulierung ihrer jeweiligen Landeswassergesetze orientiert haben. Anders als vor der Föderalismusreform 2006 gilt nun die konkurrierende Gesetzgebung, d.h. die verschiedenen Länder sind in ihrem Handlungsspielraum bei der Gesetzgebung eingeschränkt und müssen sich stark an die Vorgabe des WHG halten. Vor 2006 galt das WHG als Rahmengesetz, das von den Ländern als grobe Vorgabe behandelt wurde, die Einzelheiten in den Landeswassergesetzen wurden aber von den Ländern bestimmt und festgelegt (UBA, 2012). Beispielhaft soll nun auf das Landeswassergesetz von Baden-Württemberg eingegangen werden.

4.3 Das Wassergesetz Baden-Württemberg (WG)

In Baden-Württemberg wurde die Neufassung des Wassergesetzes (WG) am 20. Januar 2005 verabschiedet. Größtenteils wurden lediglich die Vorgaben aus dem WHG aufgegriffen, jedoch wird auf einzelne Sachverhalte detaillierter eingegangen. In §3 wird die Unterteilung der Oberflächengewässer in Gewässer erster und zweiter Ordnung festgelegt. Bei Gewässer erster Ordnung sind alle größeren Flüsse und Seen enthalten, die als Anhang im WHG nachzulesen sind. Alle anderen Oberflächengewässer sind Gewässer zweiter Ordnung. Darin nicht aufgeführt sind aber beispielsweise große Teile des Rheins oder des Neckars, da diese als Bundeswasserstraßen klassifiziert sind und damit dem Bundeswasserstraßengesetz (WaStrG) unterliegen. Zum WaStrG ist zu sagen, dass bei einer Benutzung einer Bundeswasserstraße gemäß §9 WHG oder falls größere Bauwerke die Schifffahrt behindern eine strom- und schifffahrtspolizeiliche Genehmigung einzuholen ist (§31 WaStrG, 2011). Sonst gibt es von Seiten des WaStrG keine weiteren konkreten Anforderungen. §3a WG bis §3g WG behandeln noch einmal die bereits beschriebenen Grundsätze aus dem WHG, nämlich den guten ökologischen und chemischen Zustand der Oberflächengewässer, den guten mengenmäßigen und chemischen Zustand des Grundwassers, usw. Zur Benutzung wird verständlicherweise vorgeschrieben, die Gewässer nur so zu benutzen, *„dass deren ökologische Funktionen möglichst wenig beeinträchtigt werden, alle Benutzer angemessene Vorteile aus dem Wasser ziehen können und jede vermeidbare Beeinträchtigung anderer unterbleibt“* (WG §14, 2012). Sonst wird in §13 WG und §16 WG zur Benutzung sowie zur Erlaubnis nichts Relevantes bzgl. der thermischen Nutzung von Oberflächengewässern geschrieben und lediglich auf das WHG verwiesen. Ebenso sollen nach §48 Wasserbenutzungsanlagen und andere Anlagen in, über und an oberirdischen Gewässern so betrieben werden, *„dass der Zustand des Gewässers möglichst nicht beeinträchtigt wird“* (WG §48, 2012). Weiterhin werden auch Entgelte für die Wasserentnahme festgelegt, jedoch entfällt dies beim Entnehmen und Ableiten von Oberflächenwasser, wenn aus dem Wasser unmittelbar Wärme gewonnen oder eine geringere Menge als 2000 m³ pro Kalenderjahr entnommen wird (WG §17a).

In § 76 des WG werden *„Anlagen in, über und an oberirdischen Gewässern“* behandelt. Dabei geht es um Anlagen oder Bauten, die *„die Unterhaltung des Gewässers oder sonstige Belange der Wasserwirtschaft beeinflussen, die ökologischen Funktionen des Gewässers beeinträchtigen oder die Schifffahrt oder die Fischerei gefährden oder behindern können“* (WG §76, 2012), die für eine thermische Nutzung von

Oberflächengewässern notwendig wären. Um solche Anlagen bauen zu dürfen, ist eine wasserrechtliche Genehmigung notwendig. Dies gilt aber nicht für Anlagen die nach §8 bzw. §9 WHG einer Erlaubnis oder Bewilligung bedürfen. Somit sind Anlagen mit thermischer Nutzung von Oberflächengewässern normalerweise nicht nach §76 WG zu beurteilen, sondern nach den §8 bzw. §9 WHG. Lediglich bei der Errichtung einer Brücke oder ähnlichen Bauten würde §76 WG zur Geltung kommen.

Des Öfteren wird Oberflächenwasser bereits zur Kühlung genutzt, jedoch gibt es dafür nach Auskunft des Landratsamtes Tübingen auch keine konkreten Temperaturgrenzwerte aus einer Gesetzesvorlage. Bei einer Genehmigung einer solchen Anlage wird vielmehr immer eine Einzelfallbetrachtung durchgeführt und aufgrund eines limnologischen Gutachtens Temperaturgrenzwerte festgelegt (REIN, 2012).

4.4 Gesetzliche Regelung in der Schweiz

Im Gegensatz zur deutschen Gesetzgebung gibt es in der Schweiz bereits konkrete Vorgaben und Planungshilfen für die thermische Nutzung von Oberflächengewässern. Da die Schweiz nicht Mitglied der EU ist, gilt dort die WRRL nicht. Dafür gibt es eine Schweizer Wasser- und Gewässerschutzgesetzgebung, *„eine Sammlung fallweise ineinander greifender oder kombinierbarer Gesetze und Verordnungen zum Schutz und zur Nutzung der Gewässer sowie zum Schutz vor dem Wasser“* (REY & MÜLLER, 2007). Grundlage dieser Gesetze und Verordnungen sind die Artikel 74 (Umweltschutz) und Artikel 76 (Wasser) der Bundesverfassung (BV) vom 18. April 1999 mit Stand vom 11. März 2012. In beiden Artikeln werden allgemeine Zuständigkeiten und Ziele bzgl. der Umwelt bzw. dem Wasser beschrieben. Basierend auf Artikel 76 der BV entstand am 24. Januar 1991 das Gewässerschutzgesetz (GSchG). Darin sind bereits konkrete Zahlenwerte zur thermischen Nutzung angegeben. So werden z.B. in den Artikeln 30 bis 35 GSchG genaue Zahlen genannt, welche Restwassermenge bei einer Benutzung eines Gewässers mit Wasserentnahme mindestens vorhanden sein muss und wie Ausnahmen geregelt werden können. Eine Stufe unter dem GSchG steht die Gewässerschutzverordnung (GSchV), wo einige bestimmte Artikel des GSchG aufgegriffen und genauere Auflagen beschrieben werden. So werden hier auch Temperaturgrenzwerte festgelegt, die bei einer generellen Nutzung einzuhalten sind.

Für Fließgewässer sind die wichtigsten Temperaturvorgaben, dass *„die Temperatur eines Fließgewässers [...] durch Wärmeeintrag oder -entzug gegenüber dem möglichst unbeeinflussten Zustand um höchstens 3 °C, in Gewässerabschnitten der Forellenregion um höchstens 1,5 °C, verändert werden [darf]; dabei darf die Wassertemperatur 25 °C nicht übersteigen. Diese Anforderungen gelten nach weitgehender Durchmischung“* (GSchV, Anhang 2; Ziffer 12 Punkt 4).

Diese Temperaturgrenzwerte werden auch bei der Berechnung des Leistungspotentials der Hauptgewässer in Baden-Württemberg teilweise verwendet. In Abschnitt 6.5 wird dies noch näher erläutert.

Neben den beschriebenen Vorgaben des Bundes gibt es weiterhin die kantonale Gesetzgebung, die teilweise über die Bundesgesetze hinweg reicht. Als Beispiel ist hier §24 der Konzessionsverordnung zum Wasserwirtschaftsgesetz (KonzV WWG) des Kantons Zürich zu nennen. Darin wird bei Gesuchen zur Wasserentnahme zwischen Entnahmen mit oder ohne Rückgabe ins Gewässer unterschieden. Je nach Art der Entnahme werden dann die Mindestrestwassermengen in Artikel 30 GSchG unterschiedlich betrachtet. Die zu erteilenden Konzessionen sind zeitlich begrenzt und erlöschen am Ablaufdatum, falls nicht rechtzeitig ein weiteres Konzessionsgesuch gestellt wurde.

Im Kanton Zürich gibt es von der Baudirektion und dem zugehörigen Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL) eine konkrete Planungshilfe zur Wärme- bzw. Kältenutzung aus Flüssen und Seen. Darin enthalten sind die bereits erwähnten Temperaturgrenzwerte aus dem GSchG, sowie spezielle Vorgaben zur Verwendung von Kältemitteln in der Wärmepumpe, Messwertüberwachung und weiteren Sicherheitsbestimmungen. Zum Schutz der Fische ist vorgegeben, dass bei Wasserfassungen ein Seiher vorgeschaltet sein muss, der eine Maschenweite von maximal 5 mm besitzt und die Anströmgeschwindigkeit des Entnahmewassers geringer als 10 cm/sec ist. Neben diesen Bestimmungen, die sowohl für Flüsse als auch für Seen gelten, gibt es hier noch Vorgaben, die nur für Flüsse oder Seen gelten. Für Seen gilt, dass einzuleitendes Kühlwasser nicht wärmer als 30 °C sein darf. Für verschiedene Bauweisen und Leistungsgrößen gelten dann noch weitere Voraussetzungen, auf die hier nicht näher eingegangen wird. Bei Flüssen ist zu beachten, dass eine Wasserentnahme nur über einem bestimmtem Abflusswert von 500 l/sec des Q347 erlaubt ist. Außerdem dürfen zur Fischschonzeit zwischen dem 1. Mai und dem 30. September keine Bauarbeiten am

Gewässer durchgeführt werden. Weiterhin dürfen die benötigten Bauwerke das Abflussvermögen des Flusses nicht vermindern (AWEL, 2012).

5. Praxisbeispiele bereits realisierter Anlagen

5.1 Nahwärmenetz Lauterecken

In Rheinland-Pfalz in der Stadt Lauterecken ist seit Dezember 2011 ein Nahwärmenetz in Betrieb, das mittels einer Großwärmepumpe drei Gebäude heizt. Es sind noch mehr Anschlüsse an private Wohngebäude vorhanden, sodass insgesamt 11 Gebäude geheizt werden könnten (DAHLMANN, 2012). Ein Übersichtsplan der Gesamtanlage mit den an das Nahwärmenetz angeschlossenen Gebäuden ist in Abbildung 13 dargestellt, wobei aber noch nicht alle versorgbaren Gebäude eingezeichnet sind.



Abbildung 13: Übersichtsplan des Nahwärmenetzes Lauterecken (Quelle: www.thermea.de)

Die Wärmequelle für das Nahwärmenetz ist das Wasser des Flusses Lauter, das an einem abgezweigten Wasserlauf hinter einer Mühle entnommen wird, um damit die Wärmepumpe zu betreiben. Dies hat den Vorteil, dass das Flusswasser durch die Reinigungssysteme der Mühle bereits vorgereinigt wird und Verschmutzungen wie Äste oder Laubreste herausgefiltert werden. Das Wasser wird bei dieser Anlage über eine Entfernung von ca. 150 m bis zu einer Nahwärmezentrale gepumpt, wo auch die Hochtemperaturwärmepumpe steht. Dort wird das entnommene Flusswasser ohne Zwischenkreislauf direkt dem Verdampfer zugeführt. Im Wasser verbleibende Verschmutzungen, die auch trotz der Vorfilterung durch die Mühlensysteme nicht komplett aus dem Flusswasser entfernt werden können, könnten dabei zu einer Verstopfung der Pumpenanlage führen. Aus Praxiserfahrungen nach der ersten Heizperiode im Winter 2011/2012 kann bestätigt werden, dass bei der Entnahmestelle aufgrund von Verschmutzungen teilweise nur eine eingeschränkte Entnahme möglich war. Auch in der beginnenden Heizperiode im Winter 2012/2013 ist wieder eine häufige manuelle Reinigung der Flusswasserpumpe notwendig, um einen genügend großen Volumenstrom aus der Lauter zu pumpen. Sonstige Probleme sind bisher nicht aufgetreten. In Abbildung 14 ist die Entnahmestelle im Mühlgraben dargestellt. Das abgekühlte, benutzte Wasser wird dann einige Meter flussabwärts wieder dem Mühlgraben zugeführt (DAHLMANN, 2012).



Abbildung 14: Entnahmestelle aus dem Mühlgraben der Lauter (Quelle: www.thermea.de)

Die WP-Anlage liefert eine Vorlauftemperatur von 65 °C. Mit dieser hohen Vorlauftemperatur können auch noch herkömmliche Heizkörper betrieben werden, d.h. in den versorgten Gebäuden muss nicht unbedingt eine Umrüstung auf Bodenheizung oder Wandkollektoren vorgenommen werden. Da auch z.T. denkmalgeschützte Gebäude an das Nahwärmenetz angeschlossen sind, ist dies ein großer Vorteil, da nur minimale Anschlussarbeiten und keine großen Veränderungen in den bestehenden Gebäudeteilen notwendig waren. Die Rücklauftemperatur beträgt hier 30 °C. Die Heizleistung der Gesamtanlage beträgt 232 kW bei einer Entnahmerate von 12,5 l/sec aus der Lauter. Alle technischen Daten der Anlage sind in Tabelle 1 zusammengestellt (DAHLMANN, 2012; GERDES, 2012).

Tabelle 1: Technische Details Wärmepumpenanlage Lauterecken (verändert nach: GERDES, 2012)

Heizleistung:	232 kW bei Vorlauftemperatur 65 °C / Rücklauftemperatur 30 °C
Heizleistung:	170 kW bei Vorlauftemperatur 10 °C / Rücklauftemperatur 7 °C
elektrische Leistungsaufnahme:	62 kW
Jahresarbeitszahl der WP:	3,7
Jahresheizarbeit:	520 MWh
CO ₂ -Einsparung:	53 t/a

Die Anlage ist bivalent aufgebaut, d.h. neben der Oberflächenwasserwärmepumpe ist auch noch eine Gaskesselheizung eingebaut, die bei extrem niedrigen Wassertemperaturen stufenweise zugeschaltet werden kann oder auch die Heizleistung komplett übernehmen kann. Die Wärmepumpe besitzt vier Verdichtereinheiten, die bei niedrigen Flusswassertemperaturen nacheinander abgeschaltet werden können und dementsprechend die Leistung des Gaskessels gesteigert werden kann. Damit sind die Warmwasserversorgung und die Heizung ganzjährig sichergestellt. Die Gasheizung wird durchschnittlich 20 Tage im Jahr mit unterschiedlichen Leistungsstufen zugeschaltet. Eine Besonderheit der eingebauten Wärmepumpe ist, dass als Kältemittel im WP-Kreislauf Kohlendioxid verwendet wird (DAHLMANN, 2012).

Von Seiten der genehmigenden Behörde gibt es zur Nutzung des Flusswassers folgende Auflagen (Quelle: SGD Süd, 2010):

- Die Entnahme von Wasser aus der Lauter ist bei einer Wassertemperatur der Lauter unterhalb von 2 ° Celsius (275 K) unzulässig.
- Die Temperaturdifferenz zwischen dem Entnahmewasser und Einleitungswasser darf maximal 5 ° Celsius (5 K) betragen. Der Regelwert liegt bei 3 ° Celsius bzw. 3 K.
- Die Absenkung der Temperatur des Lauterwassers nach der Einleitestelle darf 1 ° Celsius (1 K) nicht überschreiten.
- Vor der Ansaugleitung ist zum Schutz der Fische (insbesondere der Fischbrut) ein Ansaugsieb zu installieren.

Diese Temperaturvorgaben sind neben den Bestimmungen aus der Schweizer Gesetzgebung (siehe Abschnitt 4.4) Grundlage für die Berechnung des thermischen Leistungspotentials der Hauptgewässer in Baden-Württemberg, das auch in den Potentialkarten dargestellt ist. Die genaue Berechnungsmethode ist in Abschnitt 6 beschrieben. Die eben beschriebenen Temperaturvorgaben beruhen auf keinen gesetzlichen Vorgaben, die auf dem WHG basieren, sondern sind vom zuständigen Landratsamt auf Anraten des Planungsbüros angeordnet worden.

5.2 Vulkansee Eifel (Campingplatz Laacher See)

Ein weiteres bereits realisiertes Projekt mit thermischer Nutzung eines Oberflächengewässers ist die Heizung des Wirtschaftsgebäudes auf dem Campingplatz Laacher See bei Koblenz mit einer Sole/Wasser-Wärmepumpe. Hier wird aus dem ca. 2,4 km² großen und bis zu 53 m tiefen See Wasser über eine unterirdische Leitung entnommen und in einen Brunnenschacht und anschließend in den Heizungskeller des Wirtschaftsgebäudes gepumpt. Dort nimmt ein Zwischenkreislauf, in dem Sole zirkuliert, die Wärmeenergie auf und gibt diese an einem Wärmetauscher an das Kältemittel ab. Die installierte Sole/Wasser-Wärmepumpe liefert seit der Inbetriebnahme im Sommer 2007

eine Gesamtheizleistung von ca. 100 kW. Die Wasserentnahmerate beträgt bei dieser Anlage 24 m³/h bzw. 6,7 l/sec. Die Entnahmestelle liegt ca. 50 m vom Ufer entfernt in einer Tiefe von 12 m und ist mittels einer Boje markiert. In dieser Tiefe sollte die Wassertemperatur nach vorangegangenen Untersuchungen ganzjährig ca. 6-10 °C betragen. Ein weiteres Kriterium für die Entnahmetiefe von 12 m ist der Algenwuchs im Laacher See. In einer geringeren Tiefe würden die Filterschlitzte, durch die das Wasser entnommen wird, relativ schnell durch Algenbewuchs verstopfen, was eine häufige Reinigung notwendig machen würde. Mit dieser größeren Entnahmetiefe soll dies verhindert oder zumindest verringert werden. Weiterhin ist an der Entnahmestelle ein rückspülbarer Filter eingebaut, sodass regelmäßig die Filterschlitzte freigespült werden können. Trotzdem ist von Zeit zu Zeit nach Aussage des Betreibers eine manuelle Reinigung notwendig. In dem Gebäude enthalten sind ein Restaurant und sanitäre Einrichtungen des Campingplatzes, die dann das erhitzte Wasser nutzen. Die Vorlauftemperatur beträgt hier ca. 60 °C, wobei kein herkömmlicher großer Warmwasserspeicher eingebaut ist, sondern das Wasser von sechs Wärmetauschern im Durchflussprinzip erhitzt wird. Einmal wöchentlich wird das Wasser mit zwei zusätzlich angebrachten Heizstäben mit einer Leistung von jeweils 18 kW auf 75 °C erhitzt, um eventuell vorhandene Bakterien im Wasser abzutöten. Außerdem wird zur Erwärmung des Trinkwassers noch die Abwärme von Kühlaggregaten (Lebensmittelkühlung) genutzt. Im Sommer wird das Seewasser auch zur passiven Kühlung der Gebäude genutzt, wobei über einen Wärmetauscher kühles Seewasser zur Lüftungsanlage gelangt, dort Wärme aufnimmt und anschließend mit einer höheren Temperatur wieder in den See zurückgeleitet wird. Als Wärmeträgermedium im Zwischenkreis wird bei dieser Wärmepumpe Sole anstatt Wasser verwendet. Der Grund dafür liegt in der niedrigeren Einsatztemperatur. Wie schon in Abschnitt 3.1 beschrieben, besitzen herkömmliche Wasser/Wasser-Wärmepumpen je nach Hersteller einen Einsatzbereich von ca. 7 °C bis ca. 25 °C. Die hier verwendete Sole/Wasser-Wärmepumpe Logafix WPS970 I von Buderus funktioniert aufgrund des Frostschutzzusatzes in der Sole auch noch bei Temperaturen bis -5 °C, d.h. selbst wenn die Temperatur im See einmal absinken sollte, ist die Einsatzfähigkeit der Wärmepumpe und damit die Heizung und Warmwasserversorgung noch immer gewährleistet (VÖLKEL, 2008; VÖLKEL, 2012).

Zu diesem Projekt stand beim Verfassen der Arbeit kein Genehmigungsbescheid zur Verfügung, sodass auf mögliche Temperaturgrenzwerte des Seewassers oder ähnliche

Bestimmungen nicht näher eingegangen werden kann. Auch konnten keine Informationen zum aktuellen Betrieb und mögliche aufgetretene Schwierigkeiten in Erfahrung gebracht werden.

5.3 Rathaus Zürich

Eine der ältesten Wärmepumpen überhaupt ist im Rathaus in Zürich (siehe Abbildung 15) eingebaut und gilt als „weltweiter Meilenstein“ (ZOGG, 2008), die zudem als Wärmequelle das Flusswasser der Limnat nutzt. Die Limnat wird aus dem Züricher See gespeist und besitzt einen MNQ von $35,2 \text{ m}^3/\text{sec}$ bei der Messstelle 2099/00343 Zürich-Unterhard (BAUMGARTNER, 2012). Bis 1937 wurden die einzelnen Räume des Rathauses mit Holzöfen beheizt. Dann wurde in den Jahren 1937 bis 1938 eine Wärmepumpenanlage installiert, die bis zu einer minimalen Flusswassertemperatur von $6 \text{ }^\circ\text{C}$ arbeiten konnte und ca. $28,8 \text{ m}^3/\text{h}$ bzw. $8 \text{ l}/\text{sec}$ Flusswasser entzog. Die Heizleistung betrug 66 kW , wobei zur Spitzenlast-absicherung und für Notfälle eine Elektroheizung eingebaut war, die 105 kW leisten konnte. Die Vorlauftemperatur betrug dabei $48 \text{ }^\circ\text{C}$. Eine Schemaskizze der Flusswassernutzung mit Vor- und Rücklauf des Limnatwassers und der Raumlüftung im Züricher Rathaus ist in Abbildung 16 dargestellt (EGLI, 1938; LIGI, 2012).



Abbildung 15: Rathaus in Zürich mit unter dem Gebäude durchfließendem Fluss Limnat

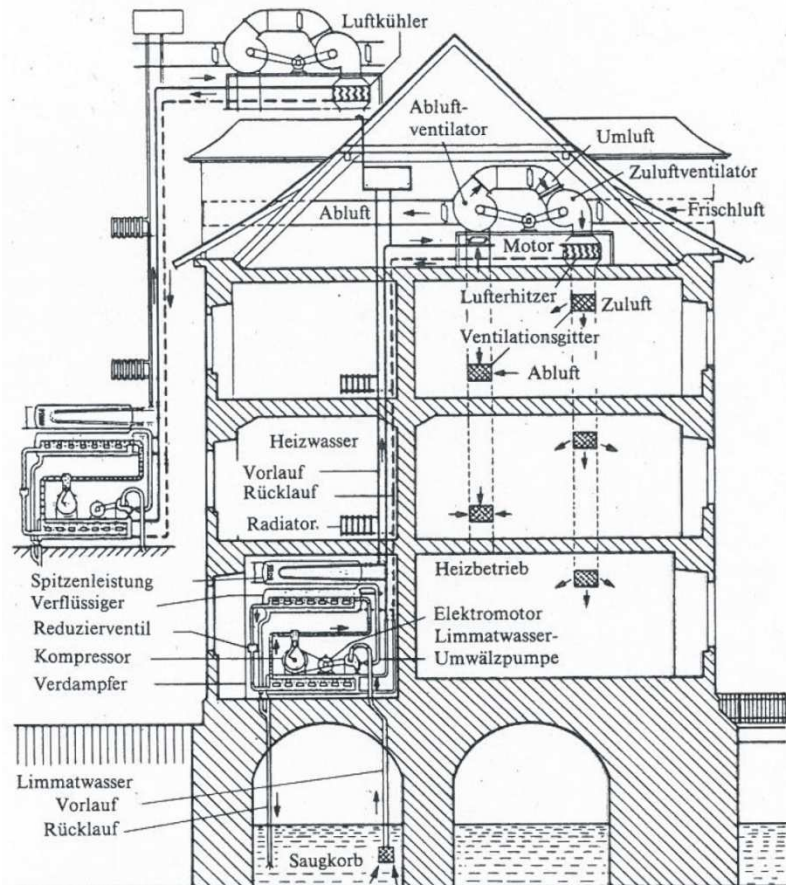


Abbildung 16: Schemaskizze des Rathaus Zürich mit WP- und Belüftungssystem (verändert nach: EGLI, 1938)

Ein weiteres Novum war, dass die Anlage im Sommer auch als Kühlmaschine und damit als eine Art Klimaanlage genutzt werden konnte. Die Kühlleistung betrug 61 kW. Damals wurde die Wärmeübertragung über Rohrbündeltauscher realisiert, heute sind dagegen Plattentauscher üblich. Diese Wärmepumpenanlage lief ohne größere Probleme, lediglich einige Instandhaltungsreparaturen und eine größere Sanierung im Jahr 1983 waren notwendig. Bei dieser Sanierung wurde auch die Klimaanlage komplett neu installiert. Im Jahr 2001, nach insgesamt 63 Betriebsjahren wurde dann eine moderne, effektivere WP eingebaut. Die alte WP-Anlage, die mittlerweile unter Denkmalschutz steht, ist aber noch immer arbeitsfähig und wird jeden Monat einmal eingeschaltet, um Alterungserscheinungen vorzubeugen. Außerdem dient sie als Notanlage, falls die neue WP eine Störung haben sollte. Beim Einbau der neuen Anlage wurde als Kältemittel R134A verwendet, die Soll-Wasserentnahmemenge beträgt nun 76 m³/h bzw. 21,1 l/sec, was eine Gesamtheizleistung von 134 kW und eine Gesamtkühlleistung von 95 kW ermöglicht. Die Entnahmerate beträgt demnach 0,06 % des MNQ bezogen die Messstelle

2099/00343 Zürich-Unterhard. Die neue Wärmepumpe kann bis zu einer minimalen Limnatwassertemperatur von 2 °C arbeiten und stellt eine Vorlauftemperatur von 55 °C zur Verfügung. Der Elektrokessel für den Notbetrieb wurde ebenfalls erweitert auf 140 kW. Bei der alten Wärmepumpe wurde das davor verwendete Kältemittel R12 ebenso durch das umweltfreundlichere Kältemittel R134A ersetzt. Die JAZ der neuen Wärmepumpenanlage wird mit ca. 4 angegeben, die der Kältemaschine mit ca. 4,5. Im Gegensatz dazu besaß die alte Wärmepumpe vor der Umrüstung auf R134A eine JAZ von 2 bis 2,2 und die Kältemaschine von ca. 1,7 (EGLI, 1938; LIGI, 2012).

Ein besonderes Augenmerk wird bei dieser Anlage auf den Befall der Wandermuscheln gelegt. Die Wandermuscheln können die Ansaugrohre bzw. die angebrachten Filter zusetzen, weshalb die Anlage zweimal jährlich gereinigt wird. Diese manuelle Reinigung ist nötig, obwohl auch hier ein rückspülbarer Filter eingebaut ist. Eine automatische Rückspülung zur Säuberung wird durchgeführt, wenn der Ansaugdruck der Pumpe aufgrund von Verschmutzungen zu groß wird. Der Grund liegt hauptsächlich bei den bereits erwähnten Wandermuscheln, die im Züricher See vorkommen und die die Ansaugleitungen bzw. den vorgeschalteten Filter zusetzen können (LIGI, 2012).

Genauere Auflagen der zuständigen Schweizer Genehmigungsbehörde liegen nicht vor, jedoch kann davon ausgegangen werden, dass die allgemeinen Vorschriften der Schweizer Gesetzgebung berücksichtigt und Temperaturgrenzwerte eingehalten werden. Diese sind bereits in Abschnitt 4.4 beschrieben worden.

5.4 Wärmepumpenanlage Walche ETH Zürich

Das Heizkraftwerk Walche in Zürich ist bereits eine größere WP-Anlage, die bis zu 52 % der Gebäude der Eidgenössischen technischen Hochschule (ETH) Zürich mit Wärme versorgt, aber auch an ein Nahwärmenetz der Stadt Zürich angeschlossen ist und überschüssige Wärmeenergie dort einspeist. Dafür ist es erforderlich, dass die Vorlauftemperatur ausreichend hoch ist. Weiterhin „*stellen Abstimmung und Optimierung von Erzeugung und Verbrauch des ganzen Netzes recht hohe Anforderungen an die Steuerung und die Regelung*“ (AMT FÜR BUNDESBAUTEN, 1988). Das Heizsystem ist in ein nahe gelegenes, priorisiertes Netz, das untere Netz (WPU) und das weiter entfernte und höher gelegene obere Netz (WPO) unterteilt. Erst wenn das WPU bedient ist und der 30 m³ Pufferspeicher im Kraftwerk beginnt sich zu füllen, wird das Heizwasser in das

WPO gepumpt. Dort ist auch ein Großspeicher mit einem Volumen von 220 m³ installiert. Die Vorlauftemperatur liegt bei der WP-Anlage Walche bei 70 °C, bei optimalen Bedingungen (hohe Limnatwassertemperatur) bei 72 °C. An dem Nahwärmenetz sind folgende Wärmelieferanten bzw. Wärmequellen angeschlossen:

- Abwärmenutzung aus ETH-Gebäuden (Rückführung von Abwärme mittels kleiner Wärmepumpen)
- Wärme aus dem Verbundnetz Stadt-Kanton-ETH (Kehricht-Verbrennungsanlage Hagenholz der Stadt Zürich und Heizwerk Aubrugg des Kantons Zürich)
- WP-Anlage Walche
- Kesselanlage mit Energiegewinnung aus Heizöl extra leicht zur Deckung des restlichen Wärmebedarfs

Bereits im Jahr 1943 wurde eine WP-Zentrale am Walcheplatz unter dem Kaspar-Escher-Haus gebaut und noch im gleichen Jahr konnte die Anlage in den Probetrieb gehen. Abbildung 17 zeigt eine skizzenhafte Darstellung der Gesamtanlage unterhalb des Walcheplatzes mit Rohrleitungen und zwei separaten Wärmepumpen.

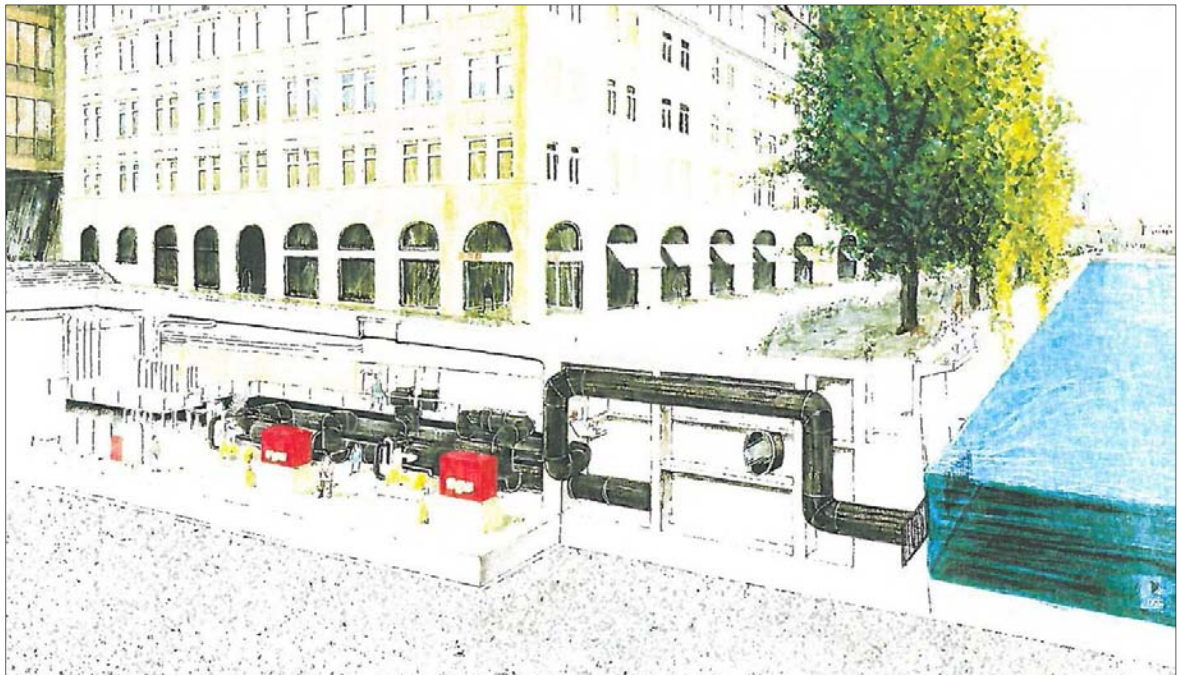


Abbildung 17: Skizze der WP-Anlage Walche in Zürich (Quelle: AMT FÜR BUNDESBAUTEN, 1988)

Die WP-Anlage war Teil des Fernheizkraftwerks der ETH Zürich und konnte eine Gesamtleistung von 5 MW liefern. 1972 war das vorübergehende Ende der Anlage aufgrund einer hohen Unwirtschaftlichkeit, die größtenteils in den sehr hohen Wartungs- und Unterhaltsarbeiten begründet war, aber auch in den zu dieser Zeit sehr niedrigen Ölpreisen. In den Jahren 1985/1986 bzw. 1987/1988 wurde dann nach vorausgegangener Planung eine neue Anlage in das bestehende Bauwerk, das ca. 6 m unter dem Grundwasserspiegel liegt, eingebaut. In der ersten Bauphase wurde eine WP mit einer Heizleistung von 6,5 MW eingebaut, diese wurde aber bei einem Brand zerstört. In der zweiten Bauphase wurden zwei identische Wärmepumpen eingebaut, die jeweils 4320 m³/h bzw. 1200 l/sec Limnatwasser entziehen, sodass eine maximale Gesamtheizleistung von 13 bis 13,4 MW möglich ist. Ausgehend von einem MNQ von 35,2 m³/sec bei der Messstelle 2099/00343 Zürich-Unterhard liegt bei dieser Anlage eine Entnahmerate von 6,8 % vor (BAUMGARTNER, 2012). Diese Heizleistung von 13 bzw. 13,4 MW lässt sich bei einer Flusswassertemperatur von 15 °C erreichen, bei einer Flusswassertemperatur von 3,5 °C kann noch eine Heizleistung von mindestens 10 MW erreicht werden. Von dieser Gesamtleistung werden ca. zwei Drittel aus dem Flusswasser gewonnen, das bei der Nutzung um 0,7 K im WP-Kreislauf abgekühlt wird. Somit liegt die Leistungszahl bei durchschnittlichen Bedingungen bei 3,08 und bei optimalen Bedingungen bei 3,38. Ab einer Leistungszahl von 3 kann von einer wirtschaftlichen Anlage gesprochen werden (TIATOR & SCHENKER, 2007). Nach der Benutzung wird das abgekühlte Limnatwasser einige Meter flussabwärts wieder in die Limnat zurückgeführt. Alle technischen Daten der WP-Anlage Walche sind in Tabelle 2 aufgelistet.

Tabelle 2: Technische Details Wärmepumpenanlage Walche ETH Zürich (verändert nach AMT FÜR BUNDESBAUTEN, 1988)

	summiert für zwei Wärmepumpen:	
	Nennwerten	max. Betriebsdaten
Heizleistung [MW]	10	13,4
Heizwasser-Vorlauftemperatur [°C]	70	72
Limnatwassertemperatur [°C]	3,5	15
Limnatwassermenge [m³/h]	8640	8640
Wärmeentzug aus Limnat [MW]	7,04	9,43
WP-Motorleistung [kW]	3240	3950
Jahresarbeitszahl [-]	3,08	3,38
Kältemittel	R134A	
Heizwassermenge [m³/h]	215	

Eine Herausforderung ist bei dieser WP-Anlage die sehr niedrige Wassertemperatur der Limnat im Winter. Als langjähriges Minimum wurde ein Wert von 3,5 bis 4 °C ermittelt.. Aufgrund dieser niedrigen Wassertemperaturen wurde ein großflächiger Verdampfer, eine Sonderkonstruktion, eingebaut, sodass die WP-Anlage bis zu einer Limnattemperatur von 1,9 °C arbeiten kann. Als Kältemittel wurde anfangs R12 verwendet, im Winter 1997/1998 wurde aber auf das umweltfreundlichere Kältemittel R134A umgerüstet. Im Zusammenhang mit der Flusswassertemperatur war auch von Seiten des Amtes für Gewässerschutz + Wasserbau des Kantons Zürich der Nachweis gefordert, dass innerhalb eines 10m-Abstandes keine Temperaturdifferenzen größer als 0,5 K oder Kurzschlussströmungen zwischen Entnahme- und Rückgabeöffnung bei Minimalabfluss vorhanden sind. Dies konnte durch die Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich (VAW) durch einen Modellversuch bestätigt werden. Weiterhin wurde bei realen Betriebsbedingungen nach der Inbetriebnahme der Einfluss des Rückgabestrahls auf die Limnatschiffahrt überprüft, mit dem Ergebnis, dass keine Beeinträchtigungen vorliegen.

Die Konstruktion ist so aufgebaut, dass das Flusswasser durch eine 3,0 x 1,5 m große Öffnung (vgl. auch Abbildung 17) unterhalb der Wasseroberfläche in eine Absetzkammer fließt. Diese Öffnung ist durch einen Motor automatisch verschließbar und durch einen Grobrechen abgeschlossen. Anschließend wird das Wasser mit einem automatischen Feinrechen gesäubert. In diesem Absetzbecken ist auch eine Vorrichtung installiert worden, die den auch hier auftretenden Befall von Wandermuscheln verhindern soll.

Mittels Druckluft, die unterhalb des Wassers eingesetzt wird, werden sich anhaftende Wandermuscheln an den Bauwerken und Rohrleitungen weggespült. Danach fließt das Wasser in Rohrleitungen mit 1100 mm Durchmesser in Richtung des Verdampfers. Um



Abbildung 18: Kugelfilter oberhalb des Verdampfers

Sedimentation von Feinschlämmen und Absetzen von Wandermuschellarven zu verhindern ist noch eine zusätzliche automatische Rohrreinigungsanlage installiert. Dies ist ein selbstreinigender Kugelfilter (vgl. Abbildung 18) mit schwammgummiartigen Kugeln, die mit dem Wasserdruck durch den Verdampfer gedrückt werden und dabei diesen reinigen. Am Ende werden die Gummikugeln durch einen Fangapparat aufgefangen und mittels einer Kugeleinspeisung dem Kreislauf wieder zugeführt. Im Sommer, wenn keine Heizung benötigt wird, ist die Anlage außer Betrieb. In dieser Zeit wird die Anlage, insbesondere der Rohrleitungsbereich und die Absetzkammer, gründlich gereinigt. Der

Aufbau der Wärmepumpenanlage als Grundrissplan ist in Abbildung 19 dargestellt. Die eingezeichneten Pfeile stellen die Fließrichtung des Limnatwassers dar, die in separaten Leitungen zu und von den WP fließen. Die Limnat fließt demnach am rechten Bildrand von oben nach unten vorbei. Die Wasserleitung führt am oberen Rand vorbei und versorgt die beiden Wärmepumpen gleichmäßig mit Limnatwasser.

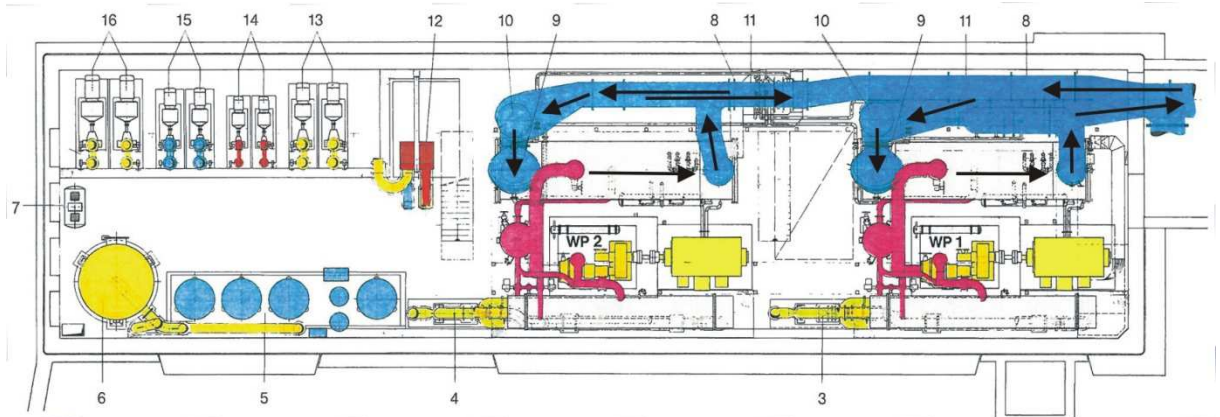


Abbildung 19: Grundrissplan der WP-Anlage Walche mit zwei gekoppelten WP (verändert nach: AMT FÜR BUNDESBAUTEN, 1988)

Für mögliche Störfälle, bei denen eventuell Kältemittel austritt, sind insgesamt drei Sicherheitsbehälter vorhanden. Zwei größere Sicherheitsbehälter sind vorgesehen, mit Kältemittel kontaminiertes Wasser aufzufangen und ein weiterer Sicherheitsbehälter, um das Kältemittel aus dem Kältemittelkreislauf abzusaugen. Alle Informationen zur WP-Anlage Walche beruhen, soweit nicht anders gekennzeichnet, auf persönlicher Auskunft von Herrn LIGI (2012) und dem Informationsheft „Alternative Wärme aus der Limnat - ETH Zürich Wärmepumpe Walche FHK – Reaktivierung + Ausbau“ des AMT FÜR BUNDESBAUTEN (1988).

6. Potentialkarte zur thermischen Nutzung von Oberflächengewässern in Baden-Württemberg

6.1 Inhalt der Karte und Zielstellung

Grundsätzlich ist die thermische Nutzung von Oberflächengewässern relativ unbekannt und auch unerforscht. Daher ist auch nicht bekannt, welche Wärme- bzw. Kälteentzugsleistungen durch diese Nutzung erreicht werden können. Um einen ersten Überblick zu bekommen, von welchen Größenordnungen hier die Rede ist, sollen Potentialkarten zur thermischen Nutzung von Oberflächengewässern in Baden-Württemberg erstellt werden. In sechs verschiedenen Karten soll für unterschiedliche Temperaturszenarien die potentielle Wärme- bzw. Kälteentzugsleistung für die Hauptgewässer in Baden-Württemberg dargestellt werden. Neben den Hauptgewässern gibt es noch viele andere Oberflächengewässer die ausreichenden Abfluss führen, um thermisch genutzt werden zu können. In dieser Arbeit soll aber zunächst das thermische Potential der größten Gewässer in Baden-Württemberg aufgezeigt werden. Diesen Berechnungen bzw. diesen Potentialkarten könnte bei einer Planung für ein reales Projekt der zu erwartende mögliche Leistungsentzug entnommen werden. Die auf unterschiedliche Temperaturszenarien und den im Folgenden beschriebenen Berechnungen basierenden Potentialkarten sind in Anhang B aufgeführt. Dabei ist zu beachten, dass die Skala der Entzugsleistung bei den unterschiedlichen Karten variiert, da die Zahlenwerte sehr stark schwanken.

6.2 Datengrundlage

Zur Erstellung der Potentialkarte von Baden-Württemberg werden Wassertemperaturmessdaten des Instituts für Hydrologie der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg verwendet. Diese Daten stammen von insgesamt 270 Messstellen, die auf 138 Oberflächengewässer verteilt sind. Hierbei sind hauptsächlich Messdaten von Fließgewässern aufgezeichnet; der einzige enthaltene See ist der Bodensee. Auch wird bereits aus der Anzahl der Messstellen und der damit abgedeckten Oberflächengewässer

ersichtlich, dass für viele Gewässer nur eine oder zwei Messstellen vorhanden sind. Dies führte zu einer sehr generalisierten Darstellung einiger Gewässer, da für deren gesamte Fließstrecke teilweise nur ein Temperaturmesswert zur Verfügung steht. Die Länge der Messperiode der Temperaturdaten liegt bei den einzelnen Messstellen zwischen einem Jahr und mehreren Jahrzehnten. Daher wird versucht, nach Möglichkeit Messstellen mit einer mehrjährigen Messperiode zu verwenden. Die Ausgangsdaten bestehen aus meist monatlichen Messungen, teilweise wurde auch zwei Mal pro Monat gemessen.

Weiterhin werden Abflusswerte sowie GIS-Datensätze des Landesamtes für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW) in Kooperation mit dem Institut für Wasser und Gewässerentwicklung (IWG) – Abteilung Hydrologie der Universität Karlsruhe aus dem Informationssystem „*Abfluss-Kennwerte in Baden-Württemberg*“ benutzt. In diesem Datensatz sind ca. 11000 Basis- und Sammeleinzugsgebiete in Baden-Württemberg enthalten (Stand: März 2006). Zur Bestimmung der regionalisierten Abflüsse werden Messwerte von 445 von insgesamt 448 Pegeln in Baden-Württemberg und im Grenzbereich Pegel der angrenzenden Länder bzw. Bundesländer herangezogen. Die verwendeten Abflussmesswerte besitzen im Gegensatz zu den Temperaturdaten eine durchschnittlich längere Messzeitreihe, sodass anhand dieser Messwerte ein Regionalisierungsmodell angewendet werden konnte, mit dem für ca. 260 Gewässer HQ_T-, MQ-, MNQ- und NQ_T-Längsschnitte erstellt wurden. Die durchschnittliche Aufzeichnungsspanne beträgt ca. 46 Jahre, die längsten mehr als 100 Jahre und die kürzesten ca. 10 Jahre (LUBW, 2007)

6.3 Datenauswahl

Die Temperatur und der Abfluss sind die zentralen Variablen, die zur Bestimmung der potentiellen Entzugsleistung der untersuchten Oberflächengewässer herangezogen werden. Um die Übersichtskarte auf Bundeslandgröße übersichtlich zu gestalten, werden einige Einschränkungen vorgenommen. Diese sind:

- Beschränkung auf die Hauptgewässer von Baden-Württemberg
- Hauptgewässer, von denen keine Temperaturmessdaten vorhanden sind, werden von der Karte entfernt

- Auswahl von Abflussmesspunkten, die eine signifikante Änderung im Abflussvolumen aufzeigen, aber auch ausreichend Abstand zueinander haben (rein visuell)
- Abflussmesspunkte mit MNQ kleiner als 100 l/sec werden nicht berücksichtigt
- Auswahl von Temperaturmesspunkten, die nicht zu nah aneinander liegen, um die Übersichtlichkeit auf der Karte zu gewährleisten

Für die Berechnung des Temperaturregimes in den Oberflächengewässern werden aus den monatlichen Ausgangsdaten verschiedene Temperaturszenarien der Gewässer angenommen. Dem Fließgewässer wird Wärme zum Heizen entzogen als auch Wärme aus Gebäuden im Kühlfall zugeführt. Daher wird zum Einen für den Heizfall die absolute Minimaltemperatur (T_{Min}) des Oberflächengewässers aus der gesamten Messreihe, die mittlere Wintertemperatur ($T_{\text{mittel Winter}}$; November bis Februar) sowie die mittlere jährliche Minimaltemperatur ($T_{\text{mittel jährl. Min}}$) jeder Temperaturmessstelle berechnet. Zum Anderen wird analog für den Kühlfall die absolute Maximaltemperatur (T_{Max}) aus der gesamten Messreihe, die mittlere Sommertemperatur ($T_{\text{mittel Sommer}}$; Juni bis September) und die mittlere jährliche Maximaltemperatur ($T_{\text{mittel jährl. Max}}$) berechnet. Außerdem werden monatliche Mittelwerte der Wassertemperatur ($T_{\text{mittel Monat}}$) berechnet, um so für jeden Monat eines Flussabschnitts die Entzugsleistung bestimmen zu können. Die eben beschriebenen Berechnungen werden mit dem Programm EXCEL 2010 durchgeführt.

6.4 Vorgehensweise bei der Kartenerstellung

Nun soll auf die Erstellung der einzelnen Flussabschnitte, mit denen später die Potentialkarte erstellt wird, eingegangen werden. Zur besseren Verständlichkeit der Vorgehensweise sind in Abbildung 20A bis 20C die einzelnen Schritte am Beispiel des Flusses Kocher dargestellt. Ausgehend von den Hauptgewässern (siehe Abbildung 20A) in Baden-Württemberg werden die Gewässernetzlinien an jedem Temperaturmesspunkt geteilt (siehe Abbildung 20B), sodass einzelne Gewässer- bzw. Flussabschnitte entstehen (siehe Abbildung 20C). Für die Temperatur jedes einzelnen Flussabschnitts wird der Mittelwert aus den zwei angrenzenden Temperaturmessstellen angenommen. Für den

Abschnitt vom letzten Temperaturmesspunkt bis zur Quelle bzw. zur Mündung in ein anderes Gewässer wird der Wert dieses Messpunktes verwendet.

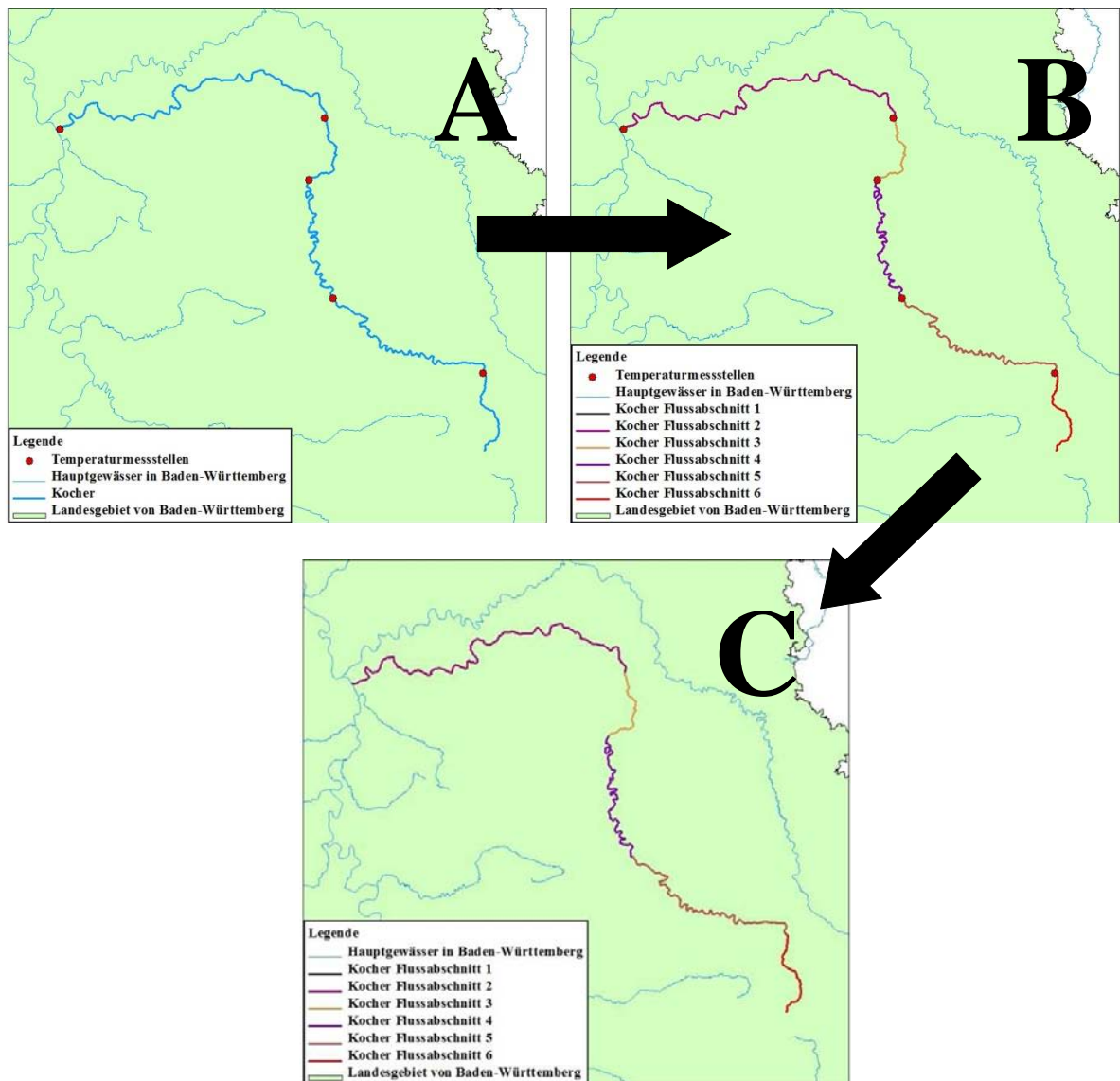


Abbildung 20: A: Originalfluss mit Temperaturmessstellen; B: Originalfluss wird an Temperaturmessstellen geteilt; C: Sechs neu erstellte Flussabschnitte

Anschließend werden die erstellten Flussabschnitte dann noch einmal an den Abflussmessstellen geteilt. Die Abbildungen 21A bis 21D zeigen die einzelnen Bearbeitungsschritte am Beispiel des Flusses Kocher. Analog zu der Vorgehensweise bei den Temperaturmessstellen werden die eben erstellten Flussabschnitte (siehe Abbildung 21A) an den Abflussmesspunkten geteilt (siehe Abbildung 21B). Dadurch sind die endgültigen Flussabschnitte erstellt (siehe Abbildung 21C), die auch in der Potentialkarte dargestellt werden. Abbildung 21D zeigt die erstellten Flussabschnitte mit allen dem Fluss Kocher zugehörigen Abfluss- und Temperaturmessstellen.

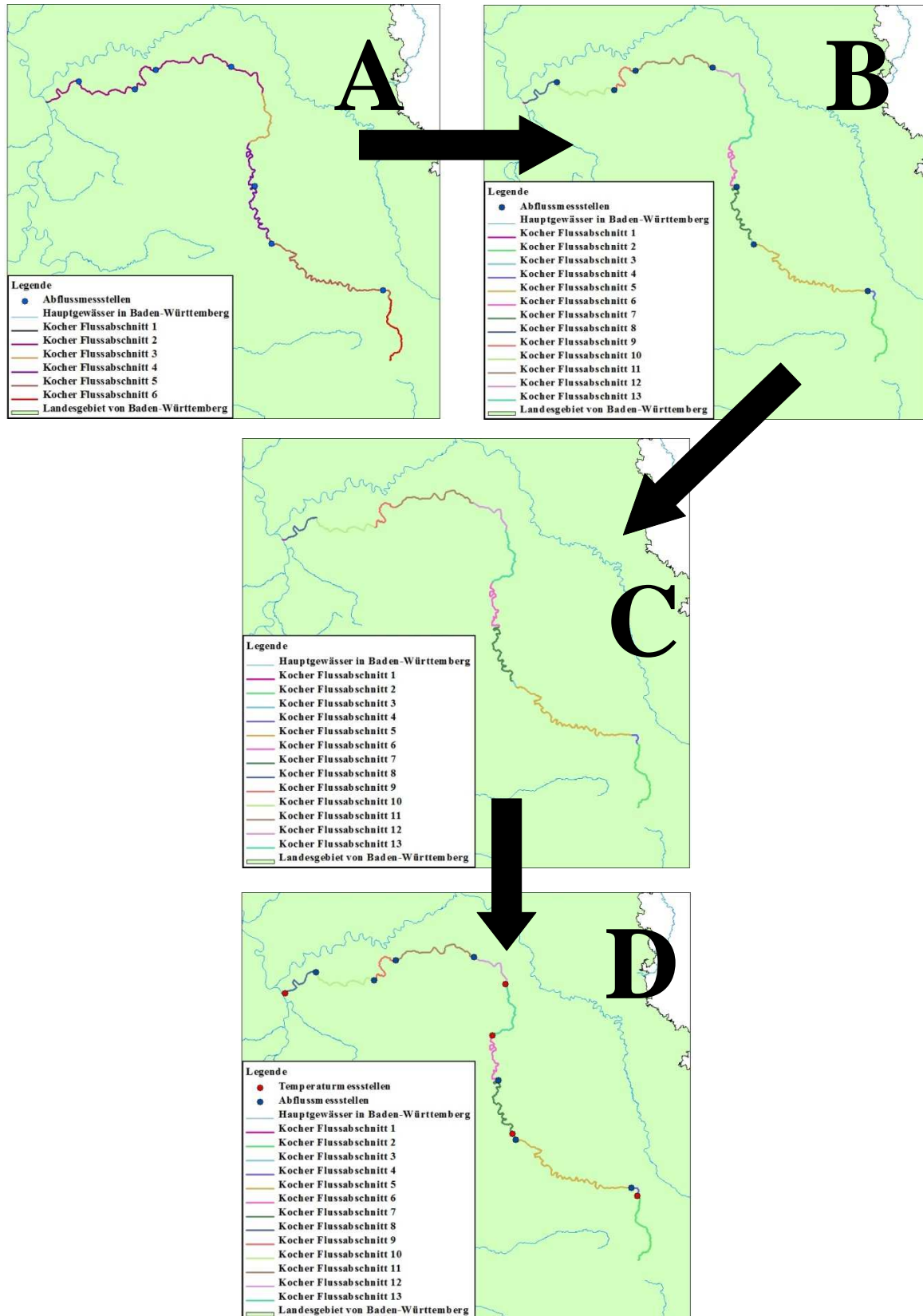


Abbildung 21: A: Flussabschnitte mit Abflussmessstellen; B: Flussabschnitte an Abflussmessstellen teilen; C: 13 neu erstellte Flussabschnitte; D: 13 neue Flussabschnitte mit Abfluss- und Temperaturmessstellen

Hierbei wird den Bereichen zwischen zwei Abflussmessstellen ein spezifischer Abflusswert zugeordnet. Dabei wird für einen Flussabschnitt immer der Abflusswert der flussaufwärts gelegenen Abflussmessstelle angenommen, da normalerweise das Abflussvolumen mit der Flusslänge zunimmt. Eine bekannte Besonderheit im Untersuchungsgebiet ist die „*Donauversinkung*“ bei Tuttlingen, bei der das Flusswasser der Donau in einem Karstwassersystem des Weißen Jura versickert und größtenteils bei der Aachtopfquelle, die ca. 12 km entfernt liegt, wieder austritt. Somit sinkt das Abflussvolumen der Donau in diesem Bereich, was bei der Berechnung der möglichen Entzugsleistung berücksichtigt wird.

Im Oberlauf der Fließgewässer von der Quelle bis zur ersten Abflussmessstelle mit MNQ größer 100 l/sec wird aufgrund der geringen Wasserführung angenommen, dass keine Nutzung zu Heiz- oder Kühlzwecken möglich ist. Somit wird für diese Flussabschnitte eine potentielle Entzugsleistung von 0 kW angegeben.

Nach den eben beschriebenen Bearbeitungsschritten wird jeder Fluss in Flussabschnitte unterteilt, dem eine spezifische Temperatur sowie ein spezifisches Abflussvolumen zugeordnet werden kann. Insgesamt werden 91 Hauptgewässer an 154 Temperatur- und 273 Abflussmessstellen geteilt, woraus 524 Flussabschnitte entstehen. Die grafische Bearbeitung und die Erstellung der Potentialkarten werden mit dem GIS-Programm ESRI ArcMap 10 durchgeführt.

6.5 Berechnung der potentiellen Entzugsleistungen der erstellten Flussabschnitte

Alle nachfolgend beschriebenen Berechnungen, mit Ausnahme der Mischwasserberechnung, werden für alle in der Potentialkarte von Baden-Württemberg dargestellten Flussabschnitte durchgeführt. Beispielhaft wird in Abschnitt 7.4 auf das Ergebnis zweier Flussabschnitte näher eingegangen. Aufgrund des großen Abflussvolumens und damit eines verhältnismäßig größeren Entzugspotential wird die Detailbetrachtung an einem Flussabschnitt des Neckars, der von Heilbronn über Neckarsulm bis Bad Friedrichshall reicht, sowie an einem Flussabschnitt der Donau bei Ulm durchgeführt. Diese Flussabschnitte mit den zugehörigen Bebauungen sind in Abbildung 22 und Abbildung 23 dargestellt.

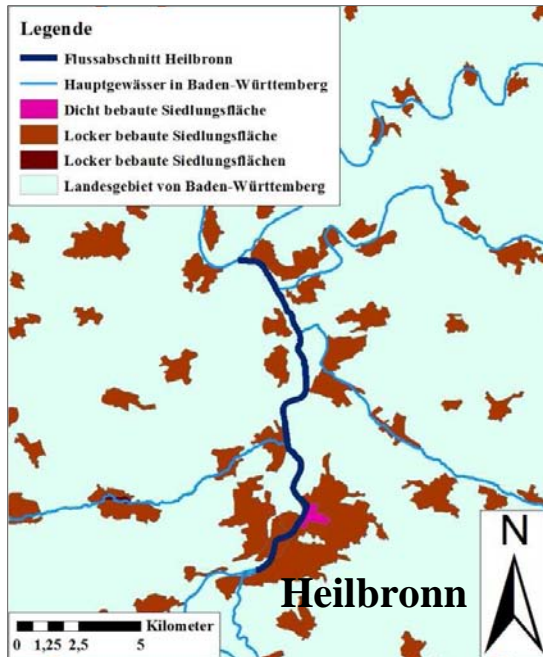


Abbildung 22: Flussabschnitt Heilbronn mit Siedlungsdichte und Bauungsart

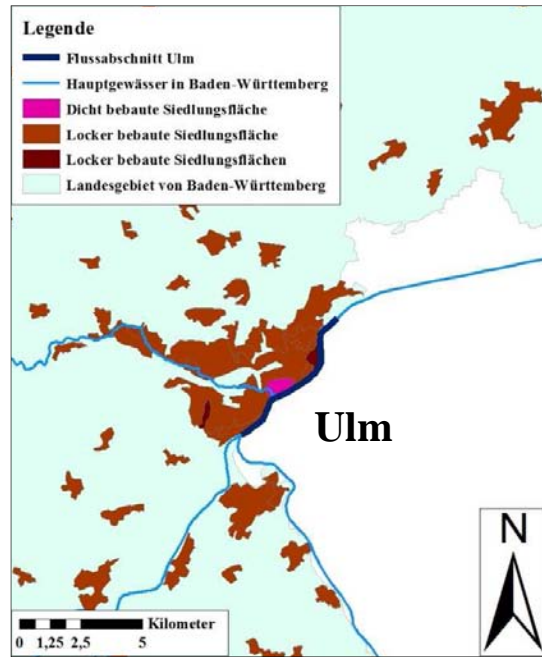


Abbildung 23: Flussabschnitt Ulm mit Siedlungsdichte und Bauungsart

Diese Flussabschnitte werden im Folgenden als Flussabschnitt Heilbronn bzw. Flussabschnitt Ulm bezeichnet. Ein weiteres Kriterium für die Auswahl dieser Flussabschnitte ist, dass dort eine höhere Siedlungsdichte am Flusslauf vorhanden ist, sodass bei einer möglichen Nutzung auch mehr Haushalte sowie industrielle Anlagen davon profitieren könnten. Die Siedlungsdichte wird aus dem Datensatz des CORINE Land Cover Projekts abgeleitet, der gemeinsam mit dem Informationssystem „Abflusskennwerte in Baden-Württemberg“ zur Verfügung gestellt wurde. Die Detailuntersuchung kann aber sinngemäß auf jeden anderen beliebigen Flussabschnitt übertragen werden. Die Vorgehensweise der Berechnung der Entzugsleistungen für jeden Flussabschnitt soll nun erläutert werden.

Wie in Abschnitt 6.4 beschrieben, sind 524 Flussabschnitte vorhanden, denen eine spezifische Wärme- bzw. Kälteentzugsleistung für die unterschiedlichen Abfluss- und Temperaturszenarien zugeteilt werden soll. Um die Berechnung durchführen zu können, müssen verschiedene Grenzwerte festgelegt werden. Diese basieren auf den Gesetzen und Verordnungen bzw. aus bereits ausgestellten Genehmigungsbescheiden. In Tabelle 3 sind alle Grenzwerte mit ihrem jeweiligen Ursprung dargestellt.

Tabelle 3: vorhandene Temperaturgrenzwerte und deren Herkunft

Messgröße	Ursprung	Zahlenwert	Einheit
Maximale Temperaturspreizung zwischen benutztem und unbenutztem Wasser	Genehmigungsbescheid Nahwärmenetz Lauterecken	5	[K]
Minimale Mischwassertemperatur des Gesamtgewässers	Genehmigungsbescheid Nahwärmenetz Lauterecken	2	[°C]
Maximale Mischwassertemperatur des Gesamtgewässers	GSchV Schweiz	25	[°C]
Maximale Temperaturveränderung des Gesamtgewässers	Genehmigungsbescheid Nahwärmenetz Lauterecken	1	[K]
Maximale Temperaturveränderung des Gesamtgewässers	GSchV Schweiz (generell und in Gewässerabschnitten der Forellenregion)	3 bzw. 1,5	[K]

Da für den Grenzwert maximale Temperaturveränderung des Gesamtgewässers verschiedene Grenzwerte vorhanden sind (Genehmigungsbescheid Nahwärmenetz Lauterecken und GSchV Schweiz), wird für die Berechnungen der „strengere“ Grenzwert aus dem Genehmigungsbescheid Nahwärmenetz Lauterecken verwendet.

Aus den beiden Werten Temperatur und Abflussvolumen bzw. den entsprechenden Wassermassen wird mit Hilfe von Gleichung 1 die Entzugsleistung berechnet:

$$P = \frac{(c * m * \Delta T)}{t} \quad (\text{Gl. 1})$$

Mit: P : Wärme- bzw. Kälteentzugsleistung [kW]

c : Spezifische Wärmekapazität von Wasser; 4,196 [kJ / (K * kg)] (Quelle: ZMARSLY ET AL, 2007)

m : Masse des entnommenen Wasservolumens; Masse entspricht bei Wasser mit Dichte 1,0 kg/l dem Volumenwert des Wasserpaketes [kg]

ΔT : Temperaturunterschied zwischen benutztem und unbenutztem Wasser [K]

t : Zeit [sec]

Die Variablen m und ΔT werden wie folgt ermittelt: für den Heizfall wird als Minimaltemperatur des entnommenen Flusswassers zur Benutzung mittels einer Wärmepumpe 2 °C und als maximale Temperaturspreizung im WP-Kreislauf 5 K angenommen. Diese Festlegungen basieren auf den eben beschriebenen Vorgaben (vgl. Tabelle 3). Das bedeutet, dass bei einer Flusswassertemperatur von 2 °C oder darunter keine weitere Abkühlung und damit keine Benutzung erlaubt ist. Ebenso darf die Temperatur des benutzten Wassers durch die Benutzung nicht um mehr als 5 K abgekühlt werden.

Für den Kühlfall liegt in Deutschland noch keine genehmigungsrechtliche Vorgabe vor, sodass aus der Schweizer Gesetzgebung (vgl. Tabelle 3) eine Temperaturobergrenze des Oberflächengewässers von 25 °C verwendet wird. Als Temperaturspreizung ist auch hier maximal 5 K erlaubt. Das bedeutet, dass bei einer Oberflächengewässertemperatur von 25 °C oder mehr das Wasser nicht mehr zu Kühlzwecken verwendet werden darf. Tabelle 4 und Tabelle 5 stellen eine Übersicht der Grenzwerte und der effektiven maximalen Temperaturspreizung für verschiedene Wassertemperaturen des Fließgewässers dar.

Tabelle 4: Maximale potentielle Temperaturspreizungen für den Heizfall bei verschiedenen Ausgangswassertemperaturen

Wassertemperatur (Messwert) [°C]	Grenzwert zur Entnahme von Wasser [°C]	erlaubte maximale Temperaturspreizung [K]	effektive maximale Temperaturspreizung [K]
0	2	5	kein Heizbetrieb möglich
1	2	5	kein Heizbetrieb möglich
2	2	5	kein Heizbetrieb möglich
3	2	5	1
4	2	5	2
5	2	5	3
6	2	5	4
7	2	5	5
8	2	5	5
9	2	5	5
10	2	5	5

Tabelle 5: Maximale potentielle Temperaturspreizungen für den Kühlfall bei verschiedenen Ausgangswassertemperaturen

Wassertemperatur (Messwert) [°C]	Grenzwert zur Entnahme von Wasser [°C]	erlaubte maximale Temperaturspreizung [K]	effektive maximale Temperaturspreizung [K]
18	25	5	5
19	25	5	5
20	25	5	5
21	25	5	4
22	25	5	3
23	25	5	2
24	25	5	1
25	25	5	kein Kühlbetrieb möglich
26	25	5	kein Kühlbetrieb möglich
27	25	5	kein Kühlbetrieb möglich
28	25	5	kein Kühlbetrieb möglich

Da die Datengrundlage des Abflusses der Oberflächengewässer weit umfangreicher ist als die der Temperaturwerte, könnten theoretisch viele verschiedene Szenarien betrachtet werden. Zum Einen können verschiedene statistische Niedrigwasserabflüsse betrachtet werden. Hierbei werden die Abflüsse für MNQ, NQ 2, NQ 5, NQ 10 und NQ 20 behandelt. Verschiedene Niedrigwasserabflüsse werden verwendet, um Entzugsleistungen berechnen zu können, die auch bei Extrembedingungen noch möglich sind. Wenn das Gewässer wenig Wasser führt, kann dementsprechend auch weniger Wasser zum Heizen bzw. Kühlen benutzt werden. Zum Anderen werden auch verschiedene Entnahmemengen aus dem Oberflächengewässer betrachtet, da nur ein kleiner Anteil des Wassers entnommen werden kann bzw. darf. Als Einteilungsstufen der Entnahmeraten werden 1%, 2%, 5%, 10% und 20% der jeweiligen Abflussmenge festgelegt. Die Begründung dieser Entnahmeraten liegt in den Ergebnissen der Mischwassertemperaturberechnung aus Abschnitt 7.1. In den erstellten thermischen Potentialkarten werden Entzugsleistungen dargestellt, die unter Verwendung der jeweiligen Temperaturszenarien und einer mittleren Entnahmerate von 5 % des MNQ berechnet werden.

6.6 Berechnung der Mischwassertemperaturen

Um eine Genehmigung zur Benutzung eines Fließgewässers zu erhalten, müssen wie in Abschnitt 6.5 beschrieben, mehrere Grenzwerte eingehalten werden. Ein wichtiger Grenzwert ist die maximal erlaubte Temperaturveränderung des Gesamtgewässers im Vergleich zum unbenutzten Wasser. Das nach der Benutzung wieder zusammengeführte Wasser wird im Folgenden als Mischwasser bezeichnet. Aufgrund dieser genehmigungsrechtlichen Bestimmungen ist es von Bedeutung, diese Mischwassertemperatur nach Einleiten des benutzten Wassers, das dann ja eine höhere bzw. niedrigere Temperatur besitzt, zu betrachten.

In Abbildung 24 ist ein Schema zur Erklärung der Begrifflichkeiten und der Berechnung der Mischwassertemperaturen dargestellt. Mit diesem Schema kann einfach der Heiz- bzw. Kühlfall erklärt werden.

Dem Heizfall / Wärmeentzugsleistung entspricht: $T_{\text{Entnahme}} > T_{\text{Rückgabe}}$

Dem Kühlfall / Kälteentzugsleistung entspricht: $T_{\text{Entnahme}} < T_{\text{Rückgabe}}$

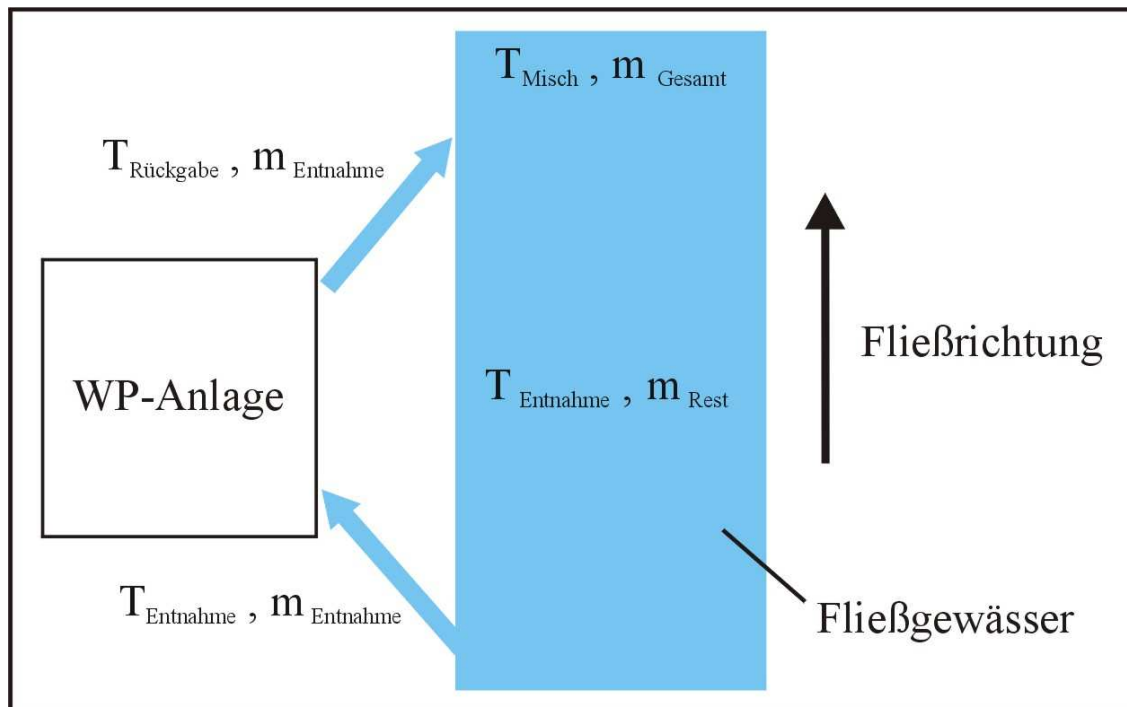


Abbildung 24: Schemaskizze zur Mischwassertemperaturberechnung

Der Mischwassertemperaturberechnung liegt die Richmann'sche Regel zu Grunde. Mit dieser kann grundsätzlich die Mischungstemperatur bestimmt werden, wenn zwei Körper unterschiedlicher Zusammensetzung zusammengeführt werden und ist in Gleichung 2 dargestellt (KUCHLING, 2007):

$$c_1 * m_1 * (T_1 - T_m) = c_2 * m_2 * (T_m - T_2) \quad (\text{Gl. 2})$$

Mit: c_1 bzw. c_2 : spezifische Wärmekapazität des jeweiligen Körpers [kJ / (K * kg)]

m_1 bzw. m_2 : Masse des jeweiligen Körpers [kg]

T_1 bzw. T_2 : Temperatur der jeweiligen Körper vor dem Zusammenführen [°C]

T_m : Mischtemperatur nach Zusammenführung der beiden Körper [°C]

Da bei der Berechnung in diesem Fall beide Anteile aus Wasser bestehen, besitzen c_1 und c_2 einen identischen Wert von 4,196 kJ/(K*kg) und können somit eliminiert werden. Durch weitere Umformungen und Substitutionen der Bezeichnungen kann die Formel umgestellt werden, sodass sich in Anlehnung an Abbildung 24 die folgende Gleichung 2 ergibt:

$$T_{\text{Misch}} = \frac{(m_{\text{Entnahme}} * T_{\text{Rückgabe}} + m_{\text{Rest}} * T_{\text{Entnahme}})}{m_{\text{Entnahme}} + m_{\text{Rest}}} \quad (\text{Gl. 3})$$

Mit: T_{Entnahme} : Temperatur des Fließgewässers vor Benutzung im WP-Kreislauf [°C]

$T_{\text{Rückgabe}}$: Temperatur des entnommenen Wassers nach Wärme- bzw. Kälteentzug im WP-Kreislauf [°C]

T_{Misch} : Mischtemperatur des Fließgewässers nach Zusammenfluss des benutzten und unbenutzten Wassers [°C]

m_{Entnahme} : Masse des entnommenen Wasservolumen; Masse entspricht bei Wasser mit Dichte 1,0 kg/l dem Volumenwert des Wasserpaketes [kg]

m_{Rest} : Masse des im Fließgewässer verbliebenen Wasserpaketes; Masse entspricht bei Wasser mit Dichte 1,0 kg/l dem Volumenwert des Wasserpaketes [kg]

Bei der Berechnung der Mischwassertemperatur ist es nicht von Bedeutung, ob das Wasser abgekühlt oder erwärmt wird. Für beide Fälle sind lediglich der Temperaturunterschied und die Menge der beiden Wasservolumina bzw. Volumenströme unterschiedlicher Temperatur wichtig. Daher wird bei der Betrachtung der Ergebnisse der Mischwassertemperatur in Abschnitt 7.1 nicht zwischen Heiz- und Kühlfall unterschieden.

Es werden verschiedene theoretische Szenarien durchgerechnet, die ein Oberflächengewässer mit einer sehr niedrigen, niedrigen, mittleren, hohen und sehr hohen Temperatur simulieren sollen. Außerdem wird ausgehend von den Anlagendaten des realen Beispiels Nahwärmenetz Lauterecken überprüft, welche Temperature Auswirkungen in der Realität zu erwarten sind.

Bei den theoretischen fünf Wassertemperaturszenarien bedeutet dies im Einzelnen, dass für den Heizfall bei einer sehr niedrigen Temperatur nur eine Temperaturspreizung von 1 K oder gar keine Nutzung und bei einer sehr hohen Temperatur eine Temperaturspreizung von 5 K möglich ist. Genau umgekehrt verhält es sich dann beim Kühlfall. Bei einer sehr niedrigen Temperatur ist eine Temperaturspreizung von 5 K und bei einer sehr hohen Temperatur eine Temperaturspreizung von 1 K oder gar keine Nutzung möglich (vgl. Tabelle 1 & 2).

Die Ausgangsdaten sind für alle Szenarien gleich, d.h. es werden erneut 1 %, 2 %, 5 %, 10 % und 20 % des Abflusses entzogen. Die Temperaturspreizungen sollen 1 K, 2 K, 3 K, 4 K und 5 K betragen.

Das betrachtete Gesamtvolumen spielt für die Berechnung der Mischwassertemperatur keine Rolle, da die Verhältnisse von benutztem zu ungenutztem Wasser aufgrund der prozentualen Angabe der Entnahmeraten immer gleich bleiben. Für die Berechnung wird, wie in Tabelle 6 dargestellt, ein Abflussvolumen von 1000 l/sec angenommen.

Tabelle 6: Ausgangsdaten zur Mischwassertemperaturberechnung

	V_{Gesamt} [l]	V_{Entnahme} [l]	V_{Rest} [l]	m_{Entnahme} [kg]	m_{Rest} [kg]
Szenario V_{Entnahme} 1 %	1000,0	10,0	990,0	10,0	990,0
Szenario V_{Entnahme} 2 %	1000,0	20,0	980,0	20,0	980,0
Szenario V_{Entnahme} 5 %	1000,0	50,0	950,0	50,0	950,0
Szenario V_{Entnahme} 10 %	1000,0	100,0	900,0	100,0	900,0
Szenario V_{Entnahme} 20 %	1000,0	200,0	800,0	200,0	800,0

7. Ergebnisse der Mischwassertemperaturberechnung und der Berechnung der potentiellen Entzugsleistung für die Flussabschnitte Heilbronn und Ulm

7.1 Betrachtung der Mischwassertemperaturen im Verhältnis zu verschiedenen Grenzwerten

Die Ergebnisse der Berechnung der Mischwassertemperaturen, wie in Abschnitt 6.6 beschrieben, sind in Tabelle 7 aufgeführt. In der linken Spalte ist die Temperaturspreizung zwischen unbenutztem Wasser und benutztem bzw. entnommenem Wasser gelistet. In den restlichen Spalten sind die resultierenden Mischwassertemperaturen nach dem Zusammenfluss des benutzten und des unbenutzten Wassers für verschiedene Entnahmemengen von 1 % bis 50 % dargestellt. Als maximale Aufheizung bzw. Abkühlung des Fließgewässers wird in Anlehnung an den Genehmigungsbescheid des Nahwärmenetzes Lauterecken, 1 K angenommen. Das bedeutet, dass der Temperaturunterschied zwischen dem ungestörten Wasser und dem benutzten Wasser höchstens 1 K sein darf. In der Schweiz gilt als Grenzwert generell ein Wert von 3 K, in Flussabschnitten in denen Forellen beheimatet sind liegt der Grenzwert bei 1,5 K. Um ein „worst-case“-Szenario abzubilden wird hier der niedrigste Grenzwert von 1 K angesetzt. Die Temperaturänderung des Mischwassers im Vergleich zum ungestörten Wasser beträgt minimal 0,01 K. Dieser Wert errechnet sich bei einer Entnahme von 1 % und einer Temperaturspreizung im WP-Kreislauf von 1 K. Die maximale Temperaturänderung des Fließgewässers liegt bei 2,5 K bei einer WP-Kreislauf-Spreizung von 5 K und einer Entnahme von 50 % des Gesamtabflusses. Die Entnahmemengen von 20 %, 30 %, 40 % und 50 % werden lediglich zur besseren Veranschaulichung in die Berechnungen mit aufgenommen. In der Praxis wären solch hohe Entnahmeraten höchstwahrscheinlich nicht genehmigungsfähig und könnten vermutlich auch technisch nicht oder nur schwierig umgesetzt werden.

Ergebnisse der Mischwassertemperaturberechnung und der Berechnung der potentiellen Entzugsleistung für die Flussabschnitte Heilbronn und Ulm

Tabelle 7: Mischwassertemperaturwerte in Abhängigkeit von der Entnahmerate

Temperaturspreizung im WP-Kreislauf [K]	maximale Veränderung der Mischwassertemperatur [K]	Temperaturspreizung [K] Wasser vor Benutzung / Mischwasser bei einer Wasserentnahme von:								
		1%	2%	5%	10%	20%	30%	40%	50%	
1	1	0,01	0,02	0,05	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	
2	1	0,02	0,04	0,10	0,20	0,40	0,60	0,80	1,00	
3	1	0,03	0,06	0,15	0,30	0,60	0,90	1,20	1,50	
4	1	0,04	0,08	0,20	0,40	0,80	1,20	1,60	2,00	
5	1	0,05	0,10	0,25	0,50	1,00	1,50	2,00	2,50	

Abbildung 25 zeigt den Verlauf der Temperaturspreizung innerhalb des Fließgewässers unter Berücksichtigung der verschiedenen Entnahmeraten. Außerdem sind die Grenzwerte der unterschiedlichen Verwaltungsvorschriften aufgetragen. Es wird deutlich dass, unabhängig von der Temperaturspreizung im WP-Kreislauf bis zu einer Entnahmerate von 20 % nie der Grenzwert von 1 K überschritten wird. Auch bei einer Entnahme von 30 % wird der Schweizer Grenzwert in Forellenregionen von 1,5 K nicht überschritten. Bei Verwendung des grundsätzlichen Schweizer Grenzwerts von 3 K als Maximum verwendet, kommt es bei keiner der hier berechneten Entnahmeraten zu einer Überschreitung. Die maximale Temperaturveränderung des Fließgewässers beträgt 2,5 K bei der Entnahme von 50 % des Gesamtabflusses und einer WP-Temperaturspreizung von 5 K.

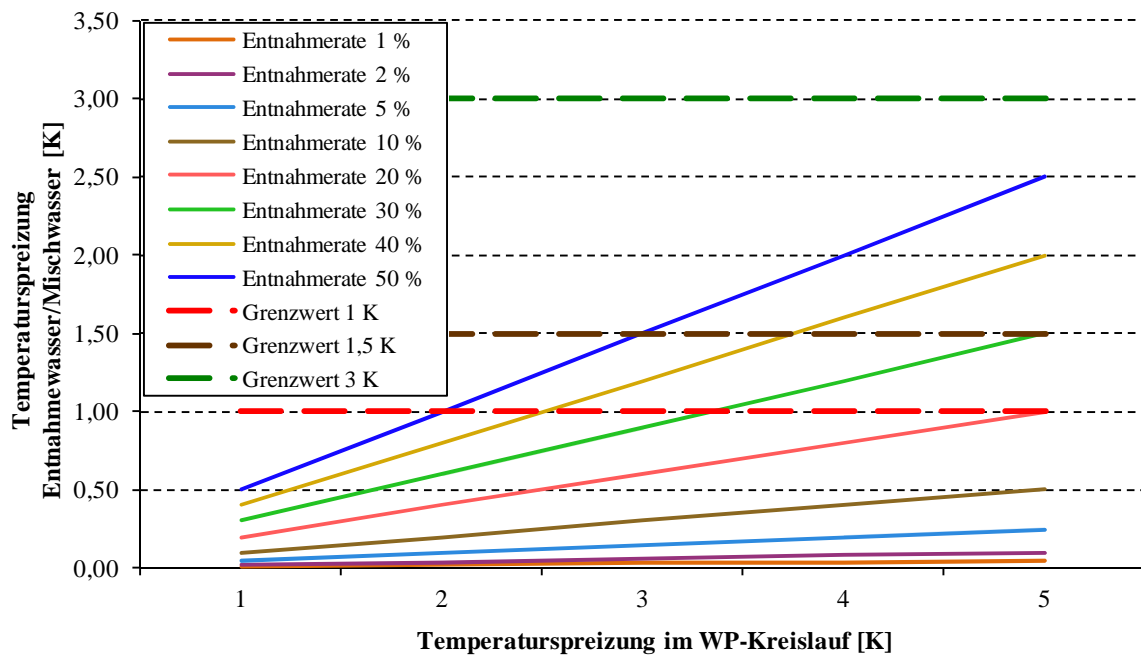


Abbildung 25: Temperaturveränderung des Mischwassers in Abhängigkeit von der Temperaturspreizung im WP-Kreislauf

7.2 Nachberechnung der Mischwassertemperatur am Beispiel des Nahwärmenetzes der Stadt Lauterecken

Da die vorangegangenen Berechnungen und auch die Entnahmeraten alle rein theoretischer Natur sind, soll nun an einem realen Beispiel, dem Nahwärmenetz der Stadt Lauterecken, die Mischwassertemperatur nachgerechnet werden. Bei der Anlage wird, wie bereits in Abschnitt 5.1 beschrieben, eine Wassermenge von 12,5 l/sec entnommen und die Wärmeenergie des Wassers genutzt. Zum Kühlen wird das Flusswasser nicht genutzt, sodass nur die Abkühlung des Wassers betrachtet wird. Da vom Pegel Nr. 2546079200 des Flusses Lauter in Lauterecken keine Kenngrößen zu Niedrigwasserabflüssen bekannt sind, wird anhand von Daten des nächsten flussaufwärts gelegenen Pegels mit den entsprechenden Kenngrößen gerechnet. Dies ist der Pegel Lohnweiler des Flusses Lauter, der ca. 2 km flussaufwärts von Lauterecken liegt. Hier beträgt der MNQ 0,914 m³/sec bzw. 914 l/sec (LUWG, 2012). Prozentual wird demnach ca. 1,4 % des MNQ der Lauter benutzt. Für die Berechnung der Temperaturabsenkung des Flusses Lauter in diesem Fall werden folgende Temperaturszenarien für das ungestörte Lauterwasser angenommen:

- Sehr niedrige Temperatur mit 3 °C
- Niedrige Temperatur mit 4 °C
- Mittlere Temperatur mit 5 °C
- Hohe Temperatur mit 6 °C
- Sehr hohe Temperatur mit 7 °C

Mit dieser Auswahl können alle möglichen Temperaturszenarien durchlaufen werden, d.h. im WP-Kreislauf kann eine Temperaturpreizung von 1 K bis 5 K erreicht werden. In Abbildung 26 sind die Werte der Temperaturveränderung des unbenutzten Wassers zum Mischwasser gegen die Werte der Temperaturpreizung im WP-Kreislauf aufgetragen. Dabei wird die reale Entnahmerate von 1,4 % des MNQ verwendet. Ebenso in der Abbildung enthalten sind die drei Grenzwerte 1 K (Nahwärmenetz Lauterecken), 1,5 K (Grenzwert Schweiz Forellenregion) und 3 K (Grenzwert Schweiz generell) sowie die Mischwassertemperaturwerte bei einer theoretischen Entnahmerate von 20 %. Es ist sehr

deutlich zu erkennen, dass bei den gegebenen Entnahmemengen es nie zu einer Überschreitung einer der drei Grenzwerttemperaturen kommt. Erst bei einer Entnahmerate von 20 % und einer Temperatursteigerung im WP-Kreislauf von 5 K wird der niedrigste Grenzwert von 1 K erreicht.

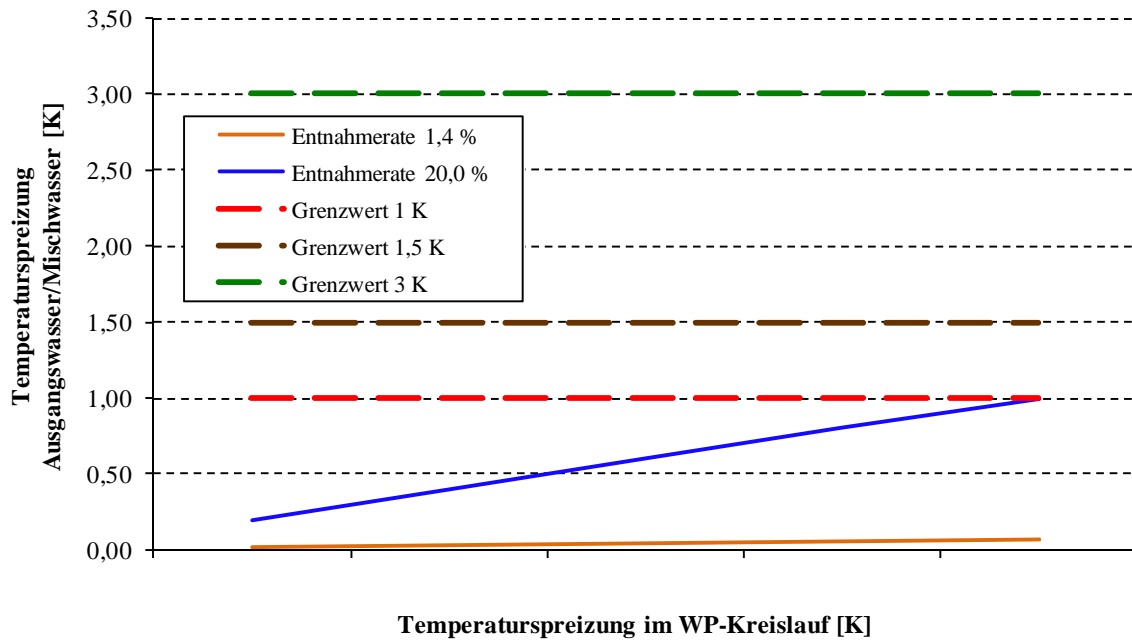


Abbildung 26: Temperaturveränderung des Mischwassers in Abhängigkeit von der Temperatursteigerung im WP-Kreislauf am Beispiel des Nahwärmenetzes Lauterecken

Aus Tabelle 8 sind die Ausgangsdaten und die für die verschiedenen Temperaturszenarien resultierenden Mischwassertemperaturen sowie die rein aus dem Gewässer gewonnene Wärmezugsleistung zu entnehmen. Daraus wird ersichtlich, dass die größte Temperaturabsenkung des Wassers der Lauter bei realen Bedingungen (5 K Temperatursteigerung im WP-Kreislauf; Entnahmemenge 12,5 l/sec) maximal 0,07 K beträgt. Die Wärmeentzugsleistung beträgt bei einer durchschnittlichen Temperatursteigerung im WP-Kreislauf von 3 K maximal 157,4 kW. Für den Kühlfall errechnen sich identische Ergebnisse mit dem Unterschied, dass sich die Wassertemperatur nach der Benutzung erhöht und nicht erniedrigt.

Ergebnisse der Mischwassertemperaturberechnung und der Berechnung der potentiellen Entzugsleistung für die Flussabschnitte Heilbronn und Ulm

Tabelle 8: Ergebnisse der Mischwasserberechnung für den Fluss Lauter bei einer realen Entnahmerate von 1,4 %

	sehr niedrige T	niedrige T	mittlere T	hohe T	sehr hohe T
MNQ [l/sec]	914,00	914,00	914,00	914,00	914,00
V_{Entnahme} [l/sec]	12,50	12,50	12,50	12,50	12,50
V_{Rest} [l/sec]	901,50	901,50	901,50	901,50	901,50
V_{Entnahme} prozentual [%]	1,37	1,37	1,37	1,37	1,37
T_{Entnahme} [°C]	3,00	4,00	5,00	6,00	7,00
$T_{\text{Rückgabe}}$ [°C]	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
$T_{\text{Spreizung}}$ [K]	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00
$T_{\text{Mischwasser}}$ [°C]	2,99	3,97	4,96	5,95	6,93
$\Delta T_{\text{absolut}}$ [K]	0,01	0,03	0,04	0,05	0,07
$\Delta T_{\text{prozentual}}$ [%]	0,46	0,68	0,82	0,91	0,98
Grenzwert Lauterecken [K]	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Grenzwert Schweiz generell [K]	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50
Grenzwert Schweiz Forellenregion [K]	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
Wärmeentzugsleistung [kW]	52,5	104,9	157,4	209,8	262,3

Tabelle 9 enthält die Werte, die zur Berechnung der maximalen Entnahmerate bis zur Überschreitung des niedrigsten Grenzwertes am Beispiel Lauterecken verwendet werden. Bei einer Entnahmerate von 20 %, was einer Wassermenge von 182,8 l/sec entspricht und einer maximalen Temperaturspreizung im WP-Kreislauf von 5 K wird der niedrigste Grenzwert von 1 K überschritten. Diese Entnahmerate von 20 % entspricht dem ca. 15-fachen der tatsächlichen Entnahmerate im realen Heizbetrieb. Entsprechend höher ist dann die Wärmeentzugsleistung. Im Gegensatz zu den realen Bedingungen bei einer Temperaturspreizung im WP-Kreislauf von 3 K, mit der 157,4 kW gewonnen werden können, wäre bei einer theoretischen Entnahmerate von 20 % eine Wärmeentzugsleistung von 2301,1 kW möglich.

Ergebnisse der Mischwassertemperaturberechnung und der Berechnung der potentiellen Entzugsleistung für die Flussabschnitte Heilbronn und Ulm

Tabelle 9: Ergebnisse der Mischwasserberechnung für den Fluss Lauter bei einer theoretischen Entnahmerate von 20 %

	sehr niedrige T	niedrige T	mittlere T	hohe T	sehr hohe T
MNQ [l/sec]	914,00	914,00	914,00	914,00	914,00
V _{Entnahme} [l/sec]	182,80	182,80	182,80	182,80	182,80
V _{Rest} [l/sec]	731,20	731,20	731,20	731,20	731,20
V _{Entnahme} prozentual [%]	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
T _{Entnahme} [°C]	3,00	4,00	5,00	6,00	7,00
T _{Rückgabe} [°C]	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
T _{Spreizung} [K]	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00
T _{Mischwasser} [°C]	2,80	3,60	4,40	5,20	6,00
ΔT _{absolut} [K]	0,20	0,40	0,60	0,80	1,00
ΔT _{prozentual} [%]	6,67	10,00	12,00	13,33	14,29
Grenzwert Lauterecken [K]	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Grenzwert Schweiz generell [K]	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50
Grenzwert Schweiz Forellenregion [K]	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
Wärmeentzugsleistung [kW]	767,0	1534,1	2301,1	3068,1	3835,1

7.3 Ergebnisse der Berechnung der potentiellen Entzugsleistungen für die Flussabschnitte Heilbronn und Ulm

Im Folgenden sollen beispielhaft die Ergebnisse der verschiedenen Berechnungen des Potentials der Wärme- bzw. Kälteentzugsleistung für die Flussabschnitte Heilbronn und Ulm vorgestellt werden. Ausgehend von den Ergebnissen der bereits im vorhergehenden Abschnitt erläuterten Mischwassertemperaturberechnung wird festgelegt, welche Entnahmeraten für die Berechnung der unterschiedlichen Entzugsleistungen verwendet werden. Diese sind 1 %, 2 %, 5 %, 10 % und 20 %, wobei die beiden letzteren Entnahmeraten in der Realität wohl eher nicht genehmigungsfähig und technisch umsetzbar sein würden, wenn der Abfluss entsprechend hoch ist. Da nach den Erkenntnissen der Mischwasserberechnung aber erst bei einer Entnahmerate von 20 % eine Überschreitung des niedrigsten Grenzwertes von 1 K Temperaturänderung des Mischwassers erreicht wird, sollen auch diese hohen Entnahmemengen in die Vorstellung der Ergebnisse mit einfließen.

Die Ergebnisse der Entzugsleistungsberechnung beruhen auf den Daten und Berechnungsschritten, die in Abschnitt 6 bereits beschrieben worden sind.

Abbildung 27 zeigt ein Beispieldiagramm, an dem erläutert werden soll, wie die später folgenden Ergebnisdiagramme zu interpretieren sind. Auf der Y-Achse ist der Gesamtabfluss des jeweiligen Flussabschnittes und auf der X-Achse die jeweilige Entzugsleistung aufgetragen. Die Entzugsleistung steigt mit der Abflussmenge, d.h. bei NQ 20 wird immer eine geringere Entzugsleistung möglich sein, als beim MNQ. In den Diagrammen abgebildet sind fünf verschiedene Entzugsleistungsgeraden für die verschiedenen Entnahmeraten der jeweiligen Niedrigwasserabflüsse. Es ist folglich zu beachten, dass die berechneten und in den folgenden Abbildungen dargestellten Entzugsleistungen nicht für die Gesamtniedrigwasser-abflüsse gelten, sondern nur für die jeweilige prozentuale Entnahmerate der Gesamtniedrigwasserabflüsse. Auch ist auf der Y-Achse nicht immer die gleiche Skalierung gewählt worden, da die Entzugsleistungen so stark variieren, dass bei niedrigen Entzugsleistungen keine optische Unterscheidung der unterschiedlichen Grafiklinien mehr möglich wäre.

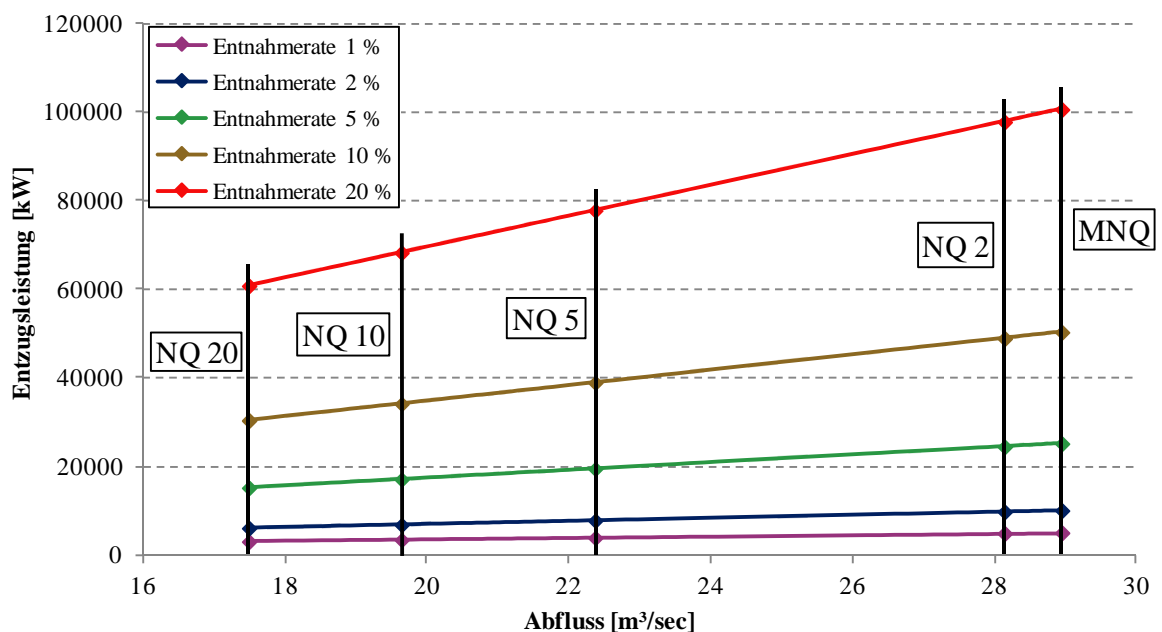


Abbildung 27: Beispieldiagramm zum besseren Verständnis der weiteren Ergebnisse

7.3.1 Flussabschnitt Heilbronn

7.3.1.1 Kälteentzugsleistung im Flussabschnitt Heilbronn

Im Folgenden sollen die Ergebnisse der Berechnung zur Kälteentzugsleistung am Beispiel des Flussabschnitts Heilbronn vorgestellt werden. Die Abbildungen 28, 29 und 30 zeigen die Abhängigkeit der Kälteentzugsleistung von der tatsächlichen Entnahmerate (1%, 2%, 5%, 10% und 20 % des jeweiligen Niedrigwasserabflusses MNQ, NQ 2, NQ 5, NQ 10 und NQ 20) bei verschiedenen Temperaturszenarien.

In Abbildung 28 ist zu erkennen, dass in diesem Flussabschnitt bei der Betrachtung des absoluten Temperaturmaximums T_{Max} der Messreihe keine Kühlung möglich ist. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die gemessene Maximaltemperatur über dem Grenzwert von 25° C liegt und damit keine weitere Energieeinspeisung in Form von Wärme in das Fließgewässer erfolgen kann bzw. darf. Die Grafiklinien für die verschiedenen Entnahmeraten liegen alle aufeinander, weshalb nur eine Linie im Diagramm angezeigt wird.

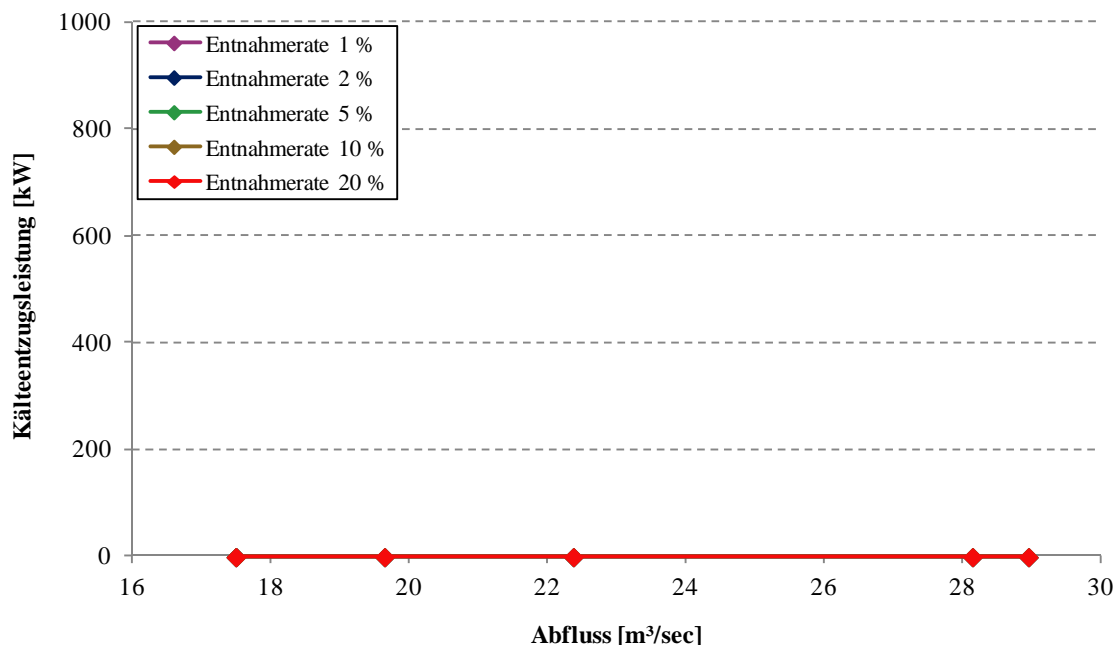


Abbildung 28: Potentielle Kälteentzugsleistung für verschiedene Entnahmeraten des jeweiligen Niedrigwasserabflusses für T_{Max} im Flussabschnitt Heilbronn

Im Gegensatz zum Temperaturszenario T_{Max} ist bei der Betrachtung des mittleren jährlichen Temperaturmaximums $T_{mittel\ jährl.\ Max}$ eine Kälteentzugsleistung möglich, wie in Abbildung 29 dargestellt. Bei der Berechnung mit $T_{mittel\ jährl.\ Max}$ ist bei einer Benutzung von 1% des NQ 20 Abflusses eine Kälteentzugsleistung von 514 kW möglich. Je nach Niedrigwasserabflussereignis ändert sich die potentiell verwendbare Energie und beträgt bei einer Wasserentnahme von 1% des MNQ 850 kW. Weiterhin steigt mit höheren Entnahmemengen von 2%, 5%, 10% und 20 % analog die mögliche Kälteentzugsleistung bis zu einem Maximum von 17006 kW bei einer theoretischen Entnahmerate von 20 % des MNQ.

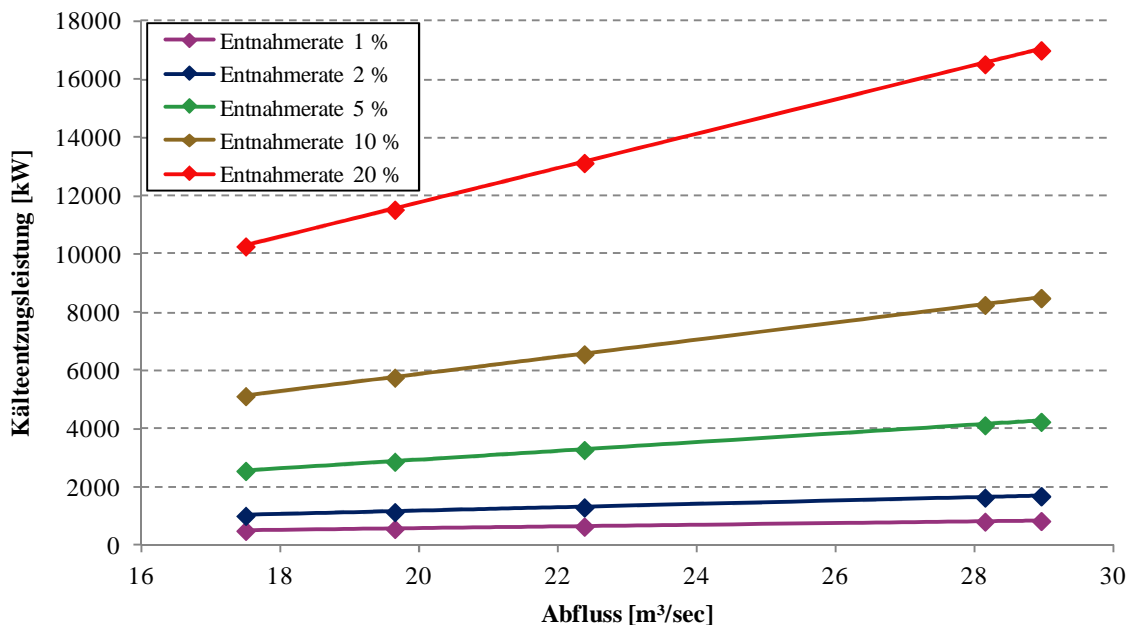


Abbildung 29: Potentielle Kälteentzugsleistung für verschiedene Entnahmeraten des jeweiligen Niedrigwasserabflusses für $T_{mittel\ jährl.\ Max}$ im Flussabschnitt Heilbronn

Auch bei der Berechnung mit der mittleren Sommertemperatur $T_{mittel\ Sommer}$ ist, wie aus Abbildung 308 ersichtlich, eine Kühlung möglich. Hier können die höchsten Kälteentzugsleistungen erreicht werden. Diese reichen von 3046 kW bei einer Entnahme von 1% des NQ 20 bis zu 5041 kW bei einer Entnahme von 1% des MNQ. Die absolut höchste Entzugsleistung im Sommer im Flussabschnitt Heilbronn beträgt theoretisch 100824 kW bei einer Entnahmemenge von 20 % des MNQ.

Ergebnisse der Mischwassertemperaturberechnung und der Berechnung der potentiellen Entzugsleistung für die Flussabschnitte Heilbronn und Ulm

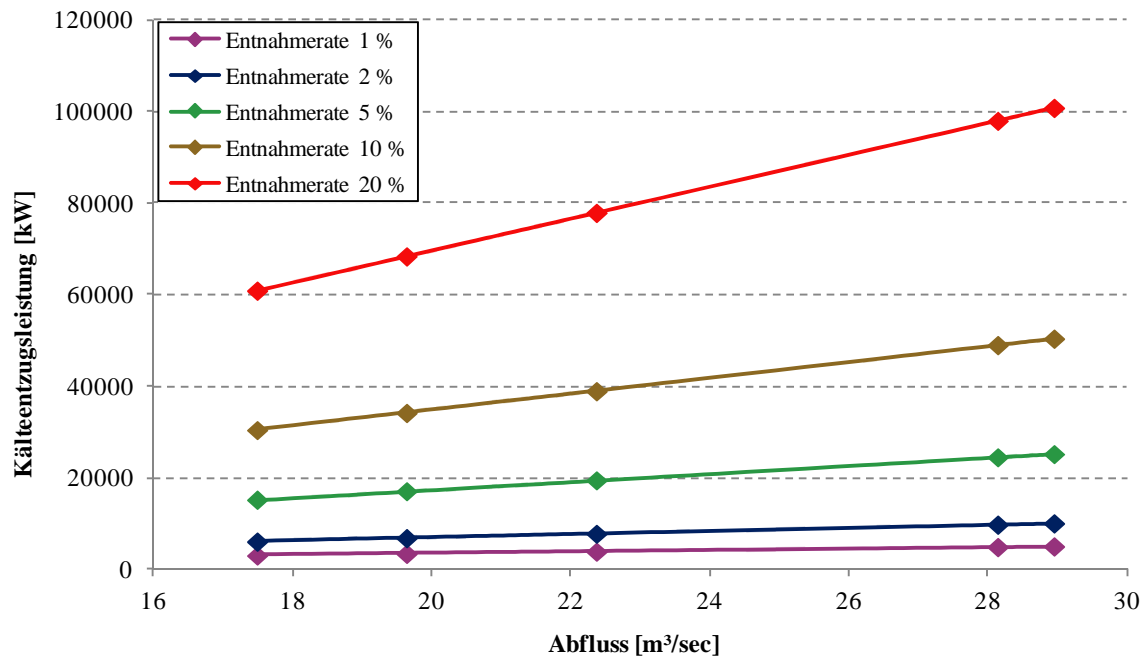


Abbildung 30: Potentielle Kälteentzugsleistung für verschiedene Entnahmeraten des jeweiligen Niedrigwasserabflusses für $T_{\text{mittel Sommer}}$ im Flussabschnitt Heilbronn

In Tabelle 10 sind die potentiellen Kälteentzugsleistungen für die verschiedenen Temperaturszenarien im Flussabschnitt Heilbronn aufgelistet.

Tabelle 10: Potentielle Kälteentzugsleistung für verschiedene Entnahmeraten des jeweiligen Niedrigwasserabflusses für T_{Max} , $T_{\text{mittel Sommer}}$ und $T_{\text{mittel jährl. Max}}$ im Flussabschnitt Heilbronn

	Entnahme [%]	Kälteentzugsleistung [kW]				
		MNQ	NQ 2	NQ 5	NQ 10	NQ 20
T_{Max}	1	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	0
	5	0	0	0	0	0
	10	0	0	0	0	0
	20	0	0	0	0	0
$T_{\text{mittel jährl. Max}}$	1	850	827	657	577	514
	2	1701	1653	1314	1154	1027
	5	4252	4133	3285	2884	2569
	10	8503	8265	6571	5769	5137
	20	17006	16531	13141	11537	10274
$T_{\text{mittel Sommer}}$	1	5041	4900	3895	3420	3046
	2	10082	9800	7791	6840	6091
	5	25206	24501	19477	17100	15228
	10	50412	49001	38954	34200	30456
	20	100824	98003	77908	68400	60912

Um einen besseren Vergleich der einzelnen Temperaturszenarien zu erhalten, ist in Abbildung 31 die Kälteentzugsleistung bei einer Entzugsmenge von 1 % bzw. 5 % des MNQ für die drei verschiedenen Temperaturszenarien gegenübergestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass bei der Berechnung mit $T_{\text{mittel Sommer}}$ und einer Entzugsmenge von 5 % die mit Abstand höchste Kälteentzugsleistung erzielt werden kann. Auch bei einer Entzugsmenge von 1 % liegt die Kälteentzugsleistung bei diesem Temperaturszenario immer noch über der Kühlleistung, die nach der Berechnung mit $T_{\text{mittel jährl. Max}}$ bzw. T_{Max} erzielt werden kann. Für T_{Max} beträgt die Entzugsleistung immer 0 kW, weshalb die zugehörigen Grafiklinien übereinander liegen und deshalb nur eine Grafiklinie erkennbar ist.

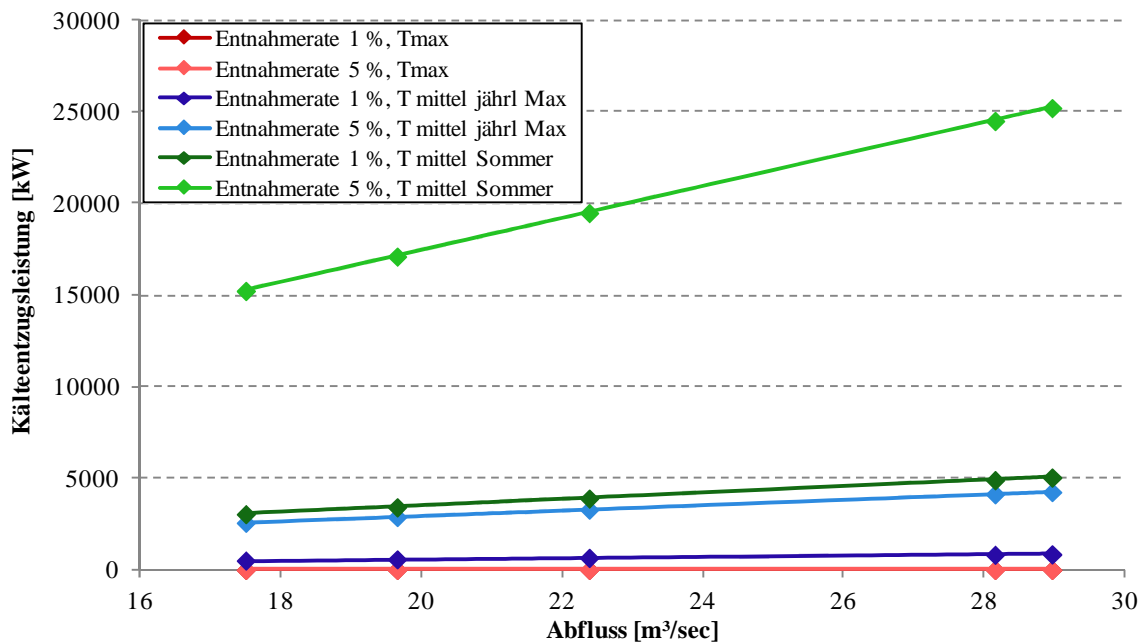


Abbildung 31: Vergleich des Leistungsangebots im Winter für Entnahmeraten von 1% und 5% des MNQ für T_{Max} , $T_{\text{mittel jährl. Max}}$ und $T_{\text{mittel Sommer}}$ im Flussabschnitt Heilbronn

Eine weitere vergleichende Darstellung ist Abbildung 32, die den Einfluss der Entnahmerate auf die potentielle Kälteentzugsleistung unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Temperaturszenarien T_{Max} , $T_{\text{mittel Sommer}}$ und $T_{\text{mittel jährl. Maximum}}$ zeigt. Hierbei ist zum Verständnis die Betrachtung der verschiedenen Niedrigwasserereignisse nicht notwendig. Es würden sich die absoluten Werte der Entzugsleistungen ändern, d.h. die Spitzenleistungen wären höher, aber die Lage der Leistungslinien zueinander bleibt unverändert. Somit sind in Abbildung 30 lediglich die Kälteentzugsleistungen für den MNQ dargestellt. Auf der X-Achse sind in diesem Fall die wirklichen Entnahmemengen

der verschiedenen Entnahmeraten 1 – 20 % des MNQ dargestellt. Aus der Grafik wird ersichtlich, dass nach der Berechnung mit der mittleren Sommertemperatur $T_{\text{mittel Sommer}}$ die mit Abstand größte Entzugsleistung erzielt werden kann. Im Vergleich zur Berechnung mit der mittleren jährlichen Maximaltemperatur beträgt die Kälteentzugsleistung ca. das 5-fache. Die jeweiligen Leistungswerte sind bereits in Tabelle 10 dargestellt worden.

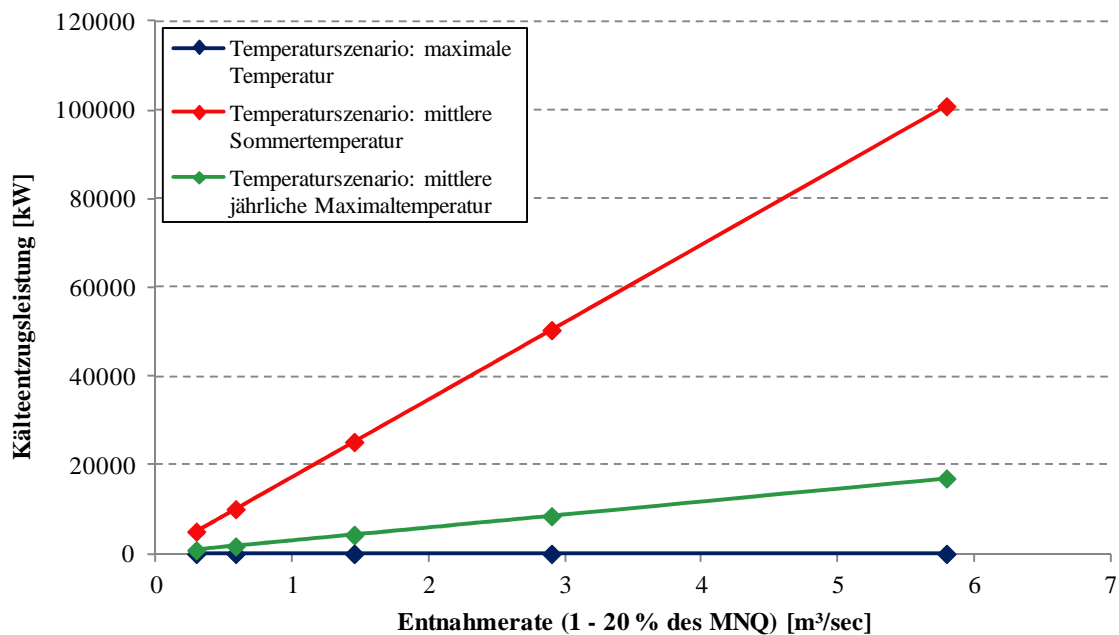


Abbildung 32: Vergleich des Leistungsangebots im Sommer für verschiedene Entnahmeraten des MNQ für T_{max} , $T_{\text{mittel Sommer}}$ und $T_{\text{mittel jährl. Max}}$ im Flussabschnitt Heilbronn

7.3.1.2 Wärmeentzugsleistung im Flussabschnitt Heilbronn

In den Kälteperioden des Jahres kann die im Flusswasser gespeicherte Wärmeenergie zum Heizen genutzt werden. Die möglichen Wärmeentzugsleistungen sind in den Abbildungen 33, 34 und 35 grafisch dargestellt.

Abbildung 33 zeigt deutlich, dass im Flussabschnitt Heilbronn gute Bedingungen zum Heizen vorliegen, sodass auch bei der Berechnung mit der absoluten Minimaltemperatur T_{Min} bei einer Wasserentnahme von 1 % des MNQ eine Entzugsleistung von 121 kW möglich ist. Bei einem NQ 20 Niedrigwasserabflussereignis und einer Wasserentnahme von 1 % können noch 73 kW entzogen werden. Für eine mittlere Entnahmerate von 5 % können beim MNQ 607 kW und beim NQ 20 noch 367 kW gewonnen werden.

Ergebnisse der Mischwassertemperaturberechnung und der Berechnung der potentiellen Entzugsleistung für die Flussabschnitte Heilbronn und Ulm

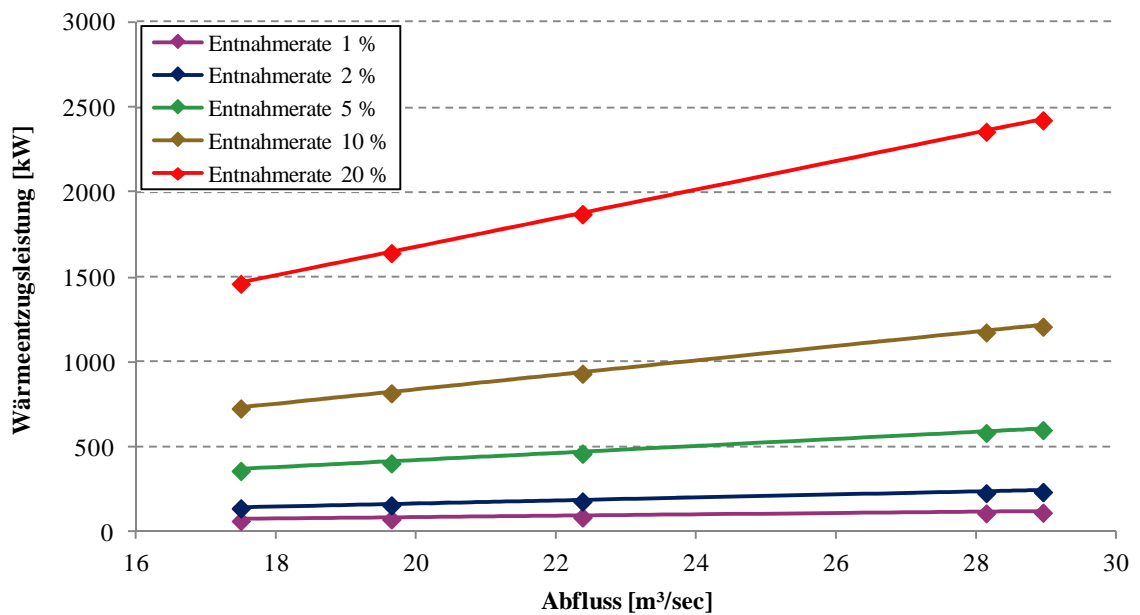


Abbildung 33: Potentielle Wärmeentzugsleistung für verschiedene Entnahmeraten des jeweiligen Niedrigwasserabflusses für T_{Min} im Flussabschnitt Heilbronn

Abbildung 34 zeigt die Wärmeentzugsleistungen, die bei verschiedenen Entnahmeraten und der Verwendung von $T_{mittel\ j\ddot{a}hrl.\ Min}$ erzielt werden können. Diese betragen für 1 % des MNQ 3848 kW und 2385 kW bei einer Entnahme von 1 % des NQ 20. Für eine höhere Entnahmerate von 5 % erhöht sich die Entzugsleistung entsprechend um das 5-fache auf 19740 kW für den MNQ und 11926 kW für den NQ 20.

Ergebnisse der Mischwassertemperaturberechnung und der Berechnung der potentiellen Entzugsleistung für die Flussabschnitte Heilbronn und Ulm

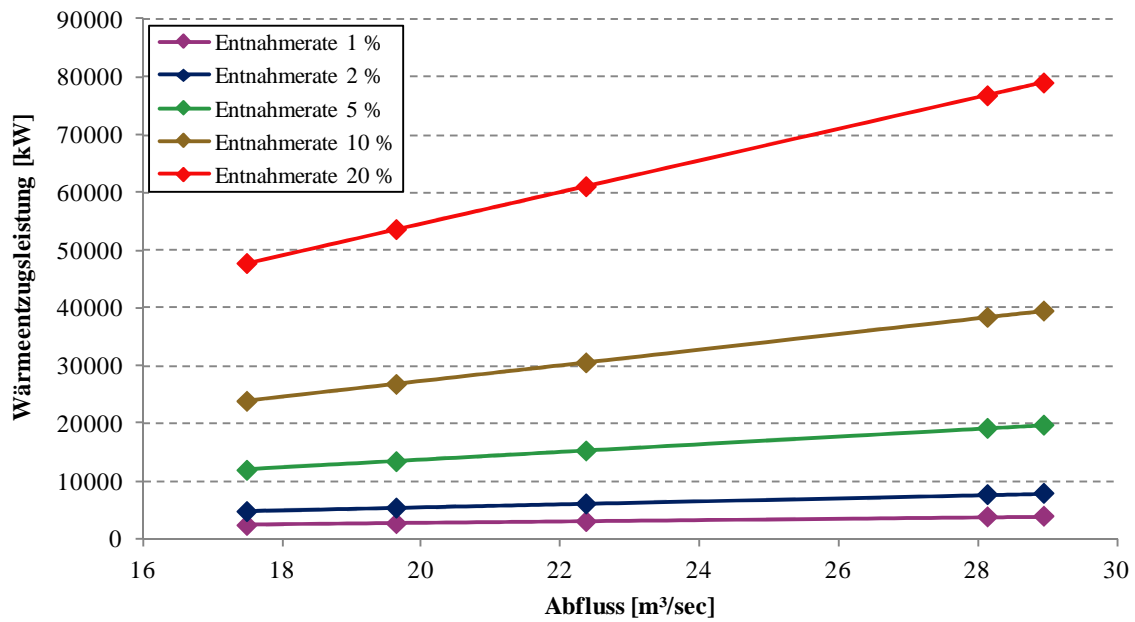


Abbildung 34: Potentielle Wärmeentzugsleistung für verschiedene Entnahmeraten des jeweiligen Niedrigwasserabflusses für $T_{\text{mittel jährl. Min}}$ im Flussabschnitt Heilbronn

Die größten Wärmeentzugsleistungen sind für den Flussabschnitt Heilbronn nach der Berechnung mit der mittleren Wintertemperatur $T_{\text{mittel Winter}}$ möglich, wie in Abbildung 35 dargestellt ist. Diese reichen von minimal 3669 kW bei einer Entnahmerate von 1 % des NQ 20 bis maximal 121474 kW bei einer theoretischen Entnahmerate von 20 % des MNQ.

Ergebnisse der Mischwassertemperaturberechnung und der Berechnung der potentiellen Entzugsleistung für die Flussabschnitte Heilbronn und Ulm

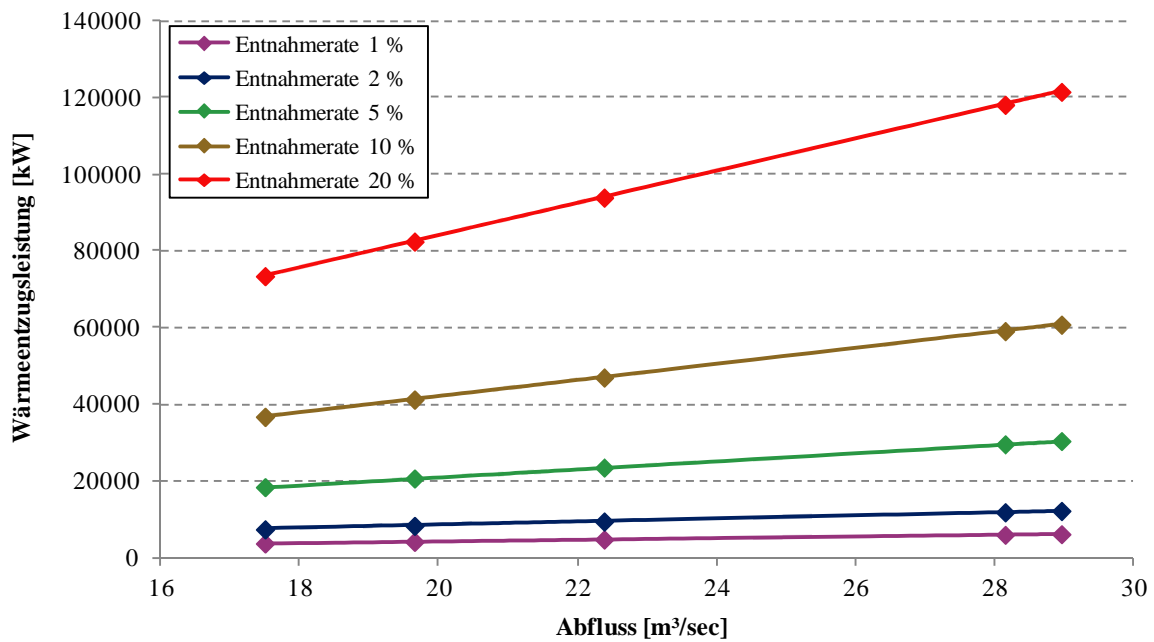


Abbildung 35: Potentielle Wärmeentzugsleistung für verschiedene Entnahmeraten des jeweiligen Niedrigwasserabflusses für $T_{\text{mittel Winter}}$ im Flussabschnitt Heilbronn

Die weiteren berechneten Werte für die Entzugsleistungen in der Heizperiode sind in Tabelle 11 aufgelistet.

Tabelle 11: Potentielle Wärmeentzugsleistung für verschiedene Entnahmeraten des jeweiligen Niedrigwasserabflusses für T_{Min} , $T_{\text{mittel Winter}}$ und $T_{\text{mittel jährl. Min}}$ im Flussabschnitt Heilbronn

		Entnahme [%]	Wärmeentzugsleistung [kW]				
			MNQ	NQ 2	NQ 5	NQ 10	NQ 20
T_{min}	1		121	118	94	82	73
	2		243	236	188	165	147
	5		607	590	469	412	367
	10		1215	1181	939	824	734
	20		2429	2362	1877	1648	1468
$T_{\text{mittel jährl. Min}}$	1		3948	3837	3051	2678	2385
	2		7896	7675	6101	5357	4770
	5		19740	19187	15253	13392	11926
	10		39479	38375	30506	26783	23851
	20		78958	76749	61012	53566	47702
$T_{\text{mittel Winter}}$	1		6074	5904	4693	4120	3669
	2		12147	11808	9386	8241	7339
	5		30369	29519	23466	20602	18347
	10		60737	59038	46932	41205	36694
	20		121474	118075	93865	82409	73388

Ergebnisse der Mischwassertemperaturberechnung und der Berechnung der potentiellen Entzugsleistung für die Flussabschnitte Heilbronn und Ulm

Zur besseren Vergleichsmöglichkeit sind in Abbildung 36 noch einmal alle Entzugsleistungen für alle Temperaturszenarien der Kälteperiode und einer Entnahmemenge von 1 % sowie 5 % des MNQ dargestellt. Daraus wird deutlich, dass nach der Berechnung mit $T_{\text{mittel Winter}}$ die größte Leistung entzogen werden kann. Danach folgt die Wärmeentzugsleistung bei Berechnung nach dem mittleren jährlichen Minimum $T_{\text{mittel jährl. Min}}$ und der geringste mögliche Leistungsentzug basiert auf der Berechnung mit der absoluten Minimalwassertemperatur T_{Min} .

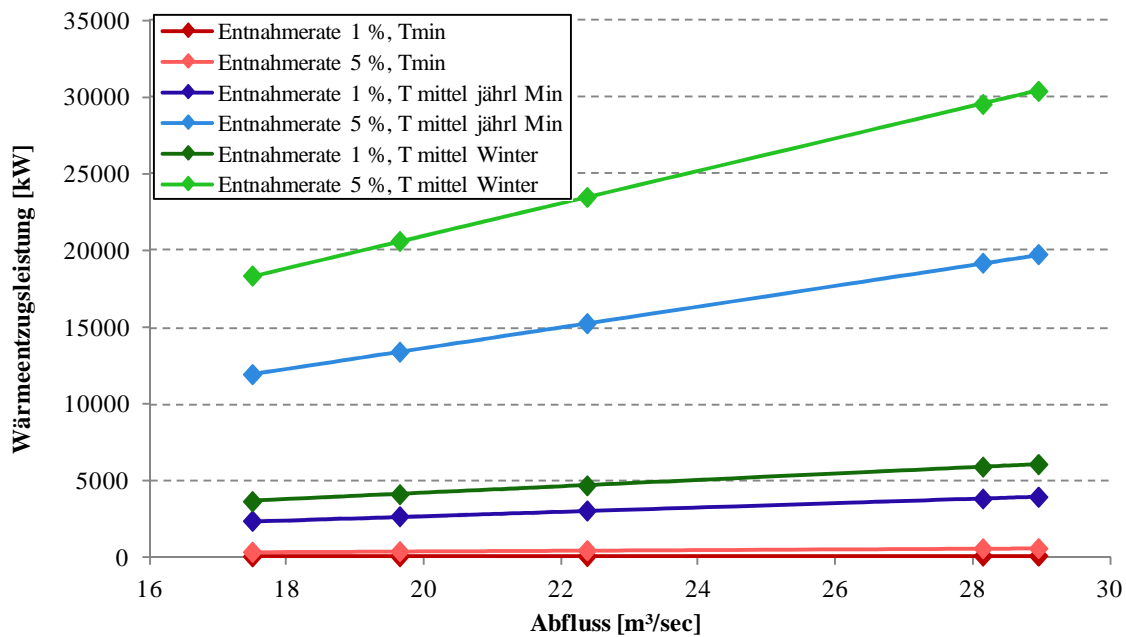


Abbildung 36: Vergleich des Leistungsangebots im Winter für Entnahmeraten von 1% und 5% des MNQ für T_{Min} , $T_{\text{mittel jährl Min}}$ und $T_{\text{mittel Winter}}$ im Flussabschnitt Heilbronn

In Abbildung 37 wird der Einfluss des verwendeten Temperaturszenarios und der Entnahmerate deutlich dargestellt. Unter Verwendung der drei Temperaturszenarios und den verschiedenen Entzugsmengen wird klar ersichtlich, dass die Wärmeentzugsleistung bei T_{Min} vergleichsweise niedrig und bei $T_{\text{mittel Winter}}$ und $T_{\text{mittel jährl Min}}$ relativ hoch ist. Für die Darstellung der Abbildung 16 gelten die gleichen Erklärungen wie für Abbildung 11.

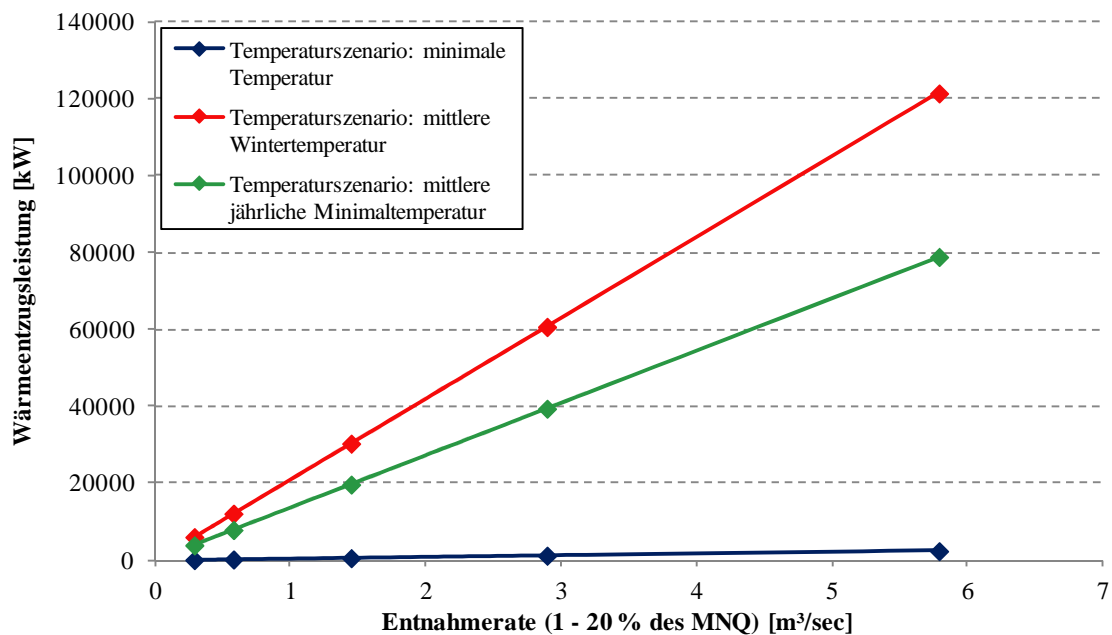


Abbildung 37: Vergleich des Leistungsangebots im Winter für verschiedene Entnahmeraten des MNQ für T_{Min} , $T_{mittel Winter}$ und $T_{mittel jährl. Min}$ im Flussabschnitt Heilbronn

7.3.1.3 Saisonales Leistungsangebot im Flussabschnitt Heilbronn

Die folgenden saisonalen Berechnungen zeigen, wie das Leistungsangebot im Flussabschnitt Heilbronn über das Jahr verteilt ist. Dabei wird für jeden Monat eine potentielle Wärme- oder Kälteentzugsleistung berechnet. Grundlage für diese Berechnungen sind monatliche Mittelwerte der Wassertemperatur $T_{mittel Monat}$ sowie der MNQ des jeweiligen Flussabschnitts wie bereits in Abschnitt 6.3 erläutert. In Abbildung 38 ist dieser jährliche Verlauf der potentiellen Wärme- bzw. Kälteentzugsleistung für verschiedene Entnahmeraten des MNQ für den Flussabschnitt Heilbronn dargestellt. Deutlich erkennbar ist, dass die Leistungsfähigkeit im Sommer stark abnimmt, im Winter hingegen immer die konstante, maximale Leistung verfügbar ist. Dies lässt sich auf die relativ hohe Wassertemperatur im Flussabschnitt Heilbronn zurückführen, sodass in der Heizperiode immer die maximale Temperaturspreizung von 5 K genutzt werden kann. Im Sommer hingegen ist die Wassertemperatur in diesem Bereich so hoch, dass die Benutzung nur mit Einschränkungen möglich ist und damit eine verringerte Leistung verfügbar ist. Nur in den Monaten Mai und September kann auch hier die maximale WP-Temperaturspreizung von 5 K erreicht werden.

Ergebnisse der Mischwassertemperaturberechnung und der Berechnung der potentiellen Entzugsleistung für die Flussabschnitte Heilbronn und Ulm

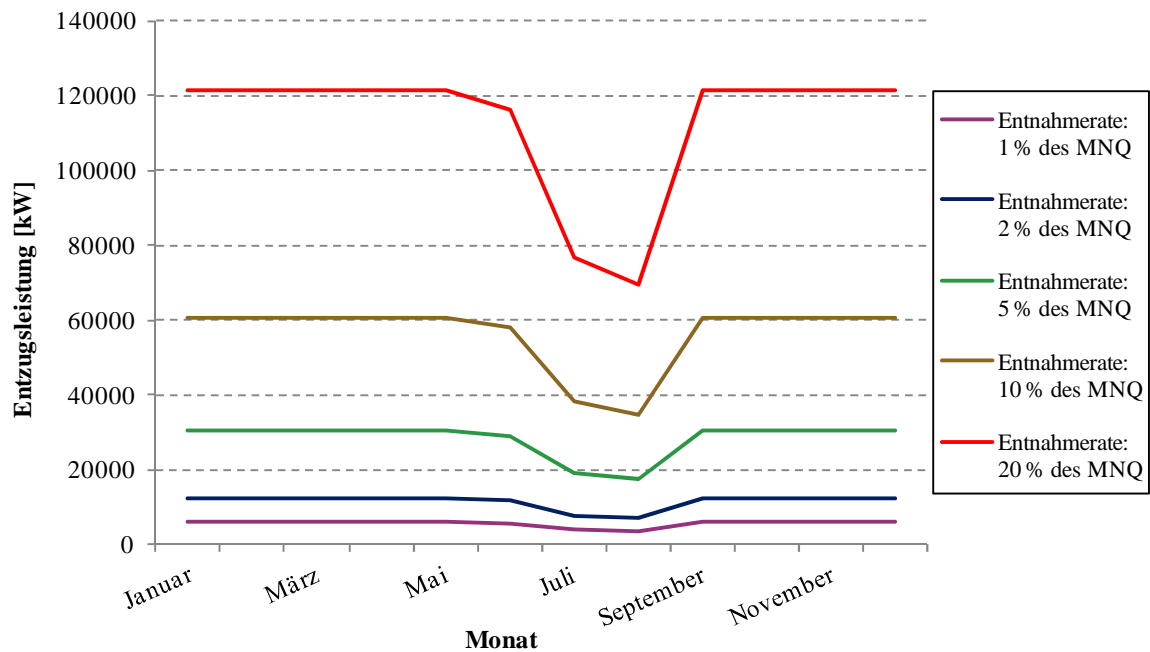


Abbildung 38: Jahresverlauf des potentiellen Leistungsangebots für verschiedene Entnahmeraten des MNQ im Flussabschnitt Heilbronn

In den Abbildungen 39 und 40 sind Einzelbetrachtungen für das Winter- und Sommerhalbjahr dargestellt. Wie bereits erwähnt, kann im Winter im Flussabschnitt Heilbronn immer die maximale Wärmeentzugsleistung von 6074 kW bei einer Entnahmerate von 1 % und 121474 kW bei einer theoretischen Entnahmerate von 20 % genutzt werden. Im Sommer kann nur in den Übergangsmonaten Mai und September das Maximum an Kälteentzugsleistung von 6074 kW bei einer Entnahme von 1 % des MNQ erzielt werden. Im Monat August, wo im Mittel die höchsten Wassertemperaturen gemessen werden, kann bei einer Entnahme von 1 % des MNQ nur etwas mehr als die Hälfte des Maximums genutzt werden, nämlich 3481 kW.

Ergebnisse der Mischwassertemperaturberechnung und der Berechnung der potentiellen Entzugsleistung für die Flussabschnitte Heilbronn und Ulm

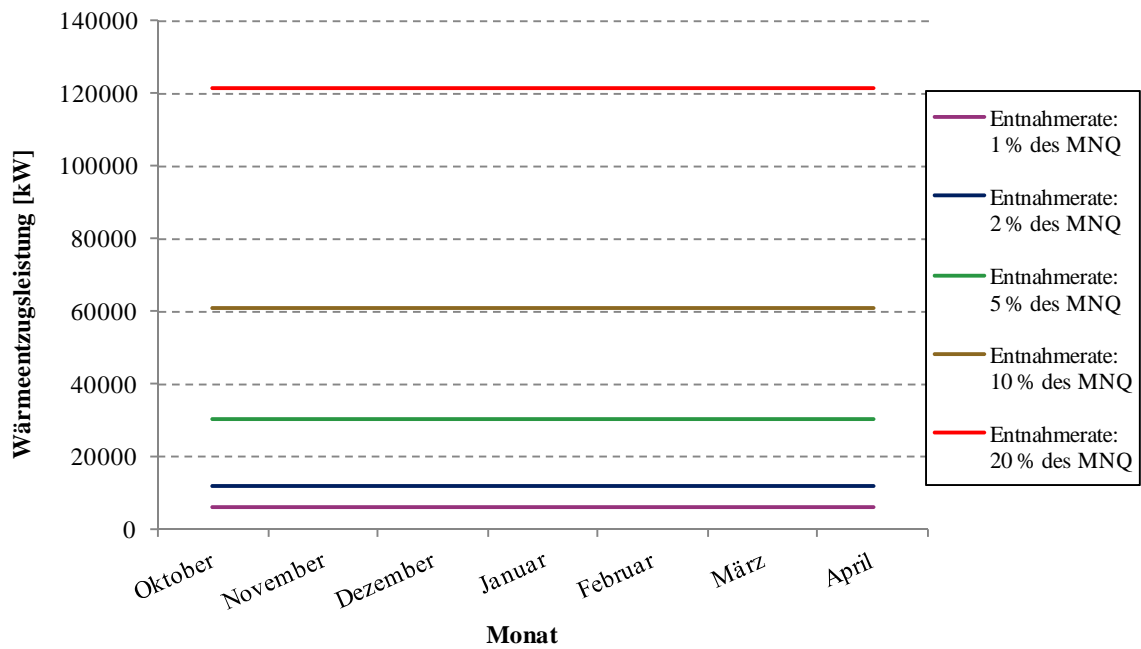


Abbildung 39: Verlauf des Leistungsangebots im Winter für verschiedene Entnahmeraten des MNQ im Flussabschnitt Heilbronn

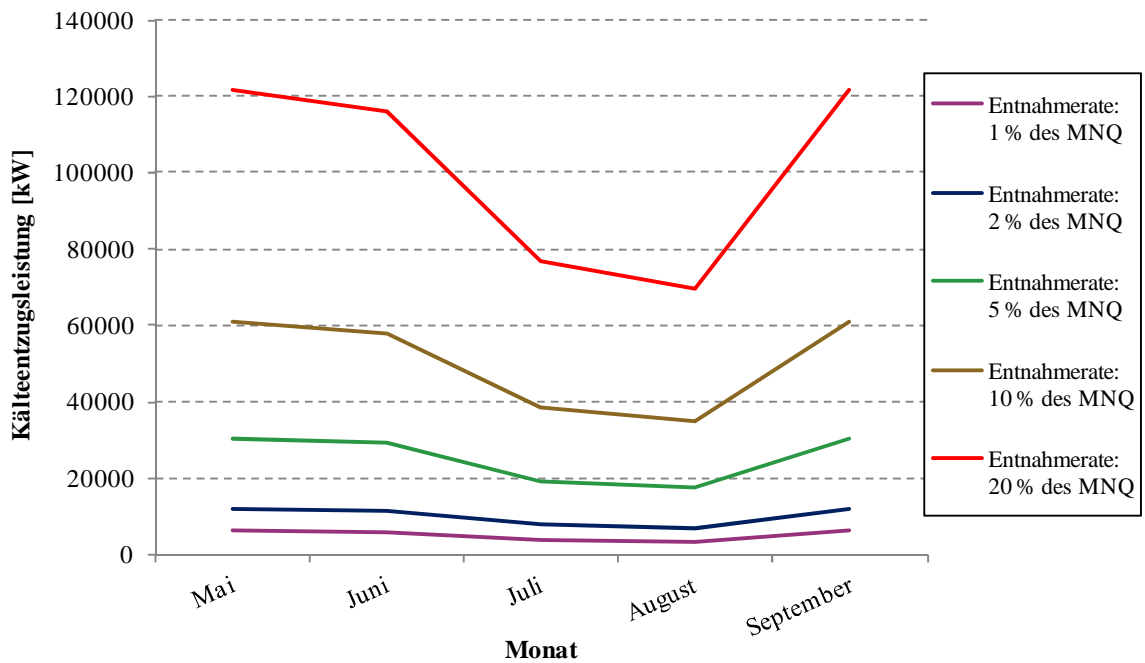


Abbildung 40: Verlauf des Leistungsangebots im Sommer für verschiedene Entnahmeraten des MNQ im Flussabschnitt Heilbronn

Ergebnisse der Mischwassertemperaturberechnung und der Berechnung der potentiellen Entzugsleistung für die Flussabschnitte Heilbronn und Ulm

Aus Tabelle 12 sind alle berechneten potentiellen Entzugsleistungen der einzelnen Monate zu entnehmen. Hierbei sind die Wintermonate, in denen geheizt wird, mit rot markiert. Die Sommermonate, in denen Kühlung benötigt wird sind blau gefärbt. Bei einer Entnahme von 1 % des MNQ kann in den Monaten September bis Mai immer das Leistungsmaximum von 6074 kW jeweils zum Heizen bzw. Kühlen genutzt werden. Lediglich in den Sommermonaten Juni, Juli und August ist die Leistungsfähigkeit des Oberflächengewässers aufgrund der erhöhten Wassertemperatur vermindert. Die verbleibende nutzbare Kälteentzugsleistung beträgt dann bei einer Entnahme von 1 % des MNQ noch 5806 kW im Juni, 3833 kW im Juli und 3481 kW im August. Bei einer höheren Entnahmemenge erhöht sich die potentielle Entzugsleistung entsprechend.

Tabelle 12: Monatliches Leistungsangebot für verschiedene Entnahmeraten des MNQ im Flussabschnitt Heilbronn

Monatliches Leistungspotential [kW]					
Entnahme [%]	1	2	5	10	20
Januar	6074	12147	30369	60737	121474
Februar	6074	12147	30369	60737	121474
März	6074	12147	30369	60737	121474
April	6074	12147	30369	60737	121474
Mai	6074	12147	30369	60737	121474
Juni	5806	11612	29029	58058	116117
Juli	3833	7665	19163	38325	76650
August	3481	6961	17403	34805	69610
September	6074	12147	30369	60737	121474
Oktober	6074	12147	30369	60737	121474
November	6074	12147	30369	60737	121474
Dezember	6074	12147	30369	60737	121474

7.3.2 Flussabschnitt Ulm

Als weiteres Beispiel sollen nun die Ergebnisse der Berechnungen für den Flussabschnitt Ulm gezeigt werden. Die Wassertemperaturen sind im Vergleich zum Flussabschnitt Heilbronn generell niedriger. Daher werden hier relativ unterschiedliche Ergebnisse erzielt, d.h. die Leistungsmaxima verschieben sich in die Sommermonate.

7.3.2.1 Kälteentzugsleistung im Flussabschnitt Ulm

Die Verteilung der möglichen Kälteentzugsleistung in den Sommermonaten für den Flussabschnitt Ulm ist in den Abbildungen 41, 42 und 43 dargestellt.

Die möglichen Kälteentzugsleistungen unter Verwendung von T_{Max} sind in Abbildung 41 dargestellt. Der mögliche Kälteentzug beträgt für den Fall von 1 % Wasserentnahme des MNQ 5333 kW. Bei einem 20-jährigen Niedrigwasserabflussereignis NQ 20 und einer Entnahmerate von 1 % beträgt der potentielle Kälteentzug noch 3349 kW. Entsprechend höher sind die Entzugsleistungen für höhere Entnahmeraten.

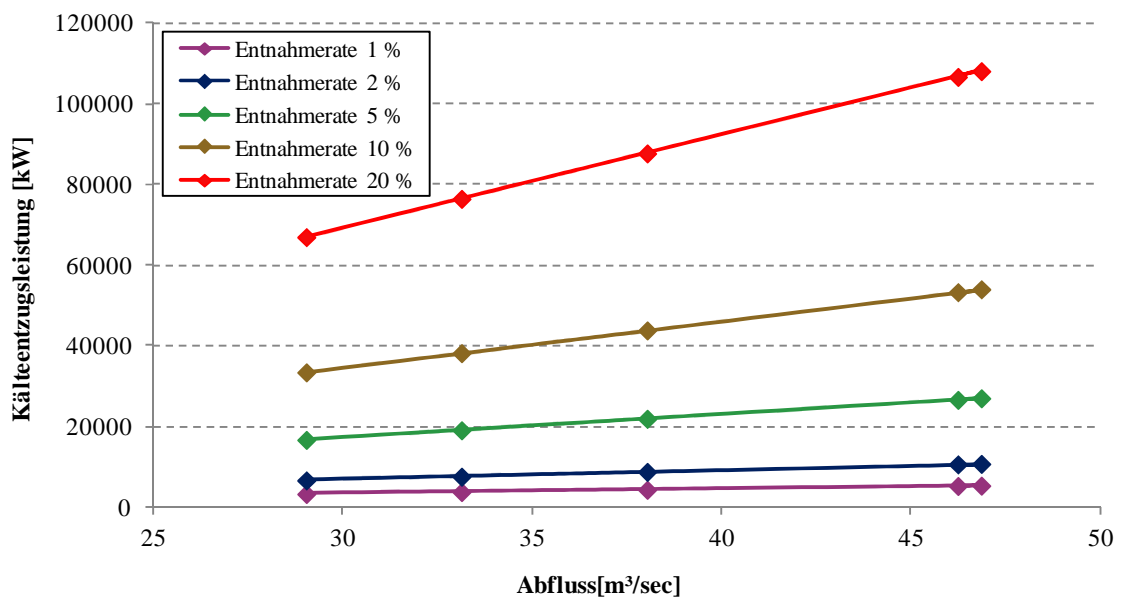


Abbildung 41: Potentielle Kälteentzugsleistung für verschiedene Entnahmeraten des jeweiligen Niedrigwasserabflusses für T_{Max} im Flussabschnitt Ulm

Die Wassertemperatur in diesem Flussabschnitt ist relativ niedrig, was dazu führt, dass $T_{\text{mittel j\ddot{a}hrl. Max}}$ sowie $T_{\text{mittel Sommer}}$ unter $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ liegen. Folglich ist die maximal mögliche Temperaturpreizung des benutzten Wassers für beide Fälle 5 K. Dies führt dazu, dass die Werte in Abbildung 42 und Abbildung 43 gleich groß sind und damit die Grafiken identische Leistungslinien beinhalten. Für beide Szenarien kann bei einer Wasserentnahme von 1 % des MNQ 9697 kW und bei 1 % des NQ 20 noch 6088 kW Kälteentzugsleistung erreicht werden. Für höhere Entnahmeraten errechnen sich dann auch jeweils höhere Entzugsleistungen von bis zu 196541 kW bei einer theoretischen Entnahmerate von 20 % des NQ 2.

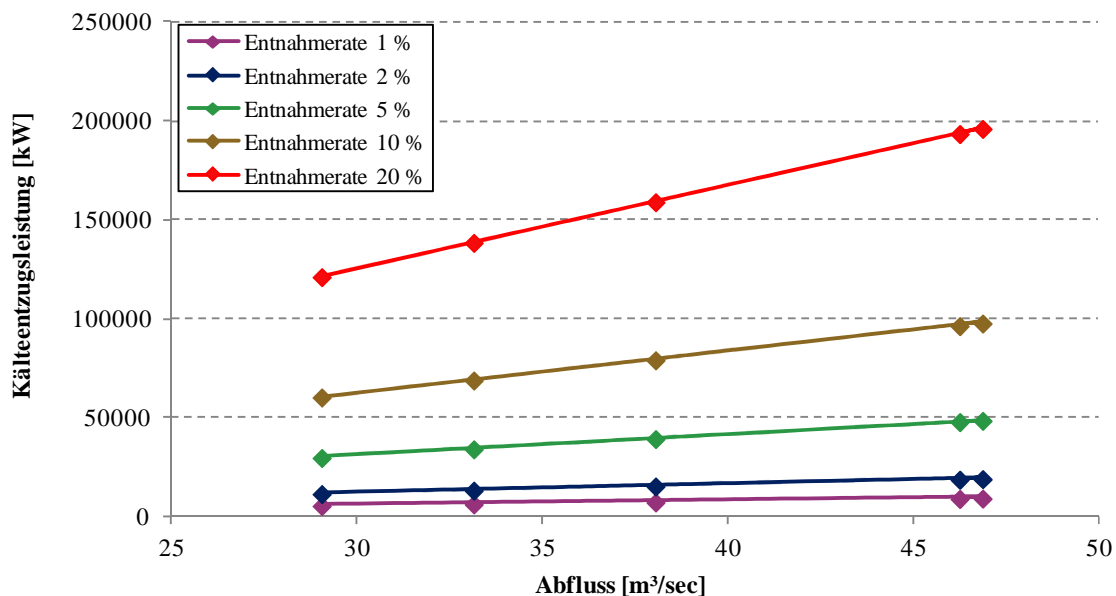


Abbildung 42: Potentielle Kälteentzugsleistung für verschiedene Entnahmeraten des jeweiligen Niedrigwasserabflusses für $T_{\text{mittel j\ddot{a}hrl. Max}}$ im Flussabschnitt Ulm

In Abbildung 43 ist die Kälteentzugsleistung für die verschiedenen Entnahmeraten unter Verwendung des Temperaturszenarios $T_{\text{mittel Sommer}}$ dargestellt. Die entsprechenden Leistungen sind identisch mit denen, die bereits für Abbildung 42 erläutert worden sind. Daher wird hier nicht noch einmal darauf eingegangen.

Ergebnisse der Mischwassertemperaturberechnung und der Berechnung der potentiellen Entzugsleistung für die Flussabschnitte Heilbronn und Ulm

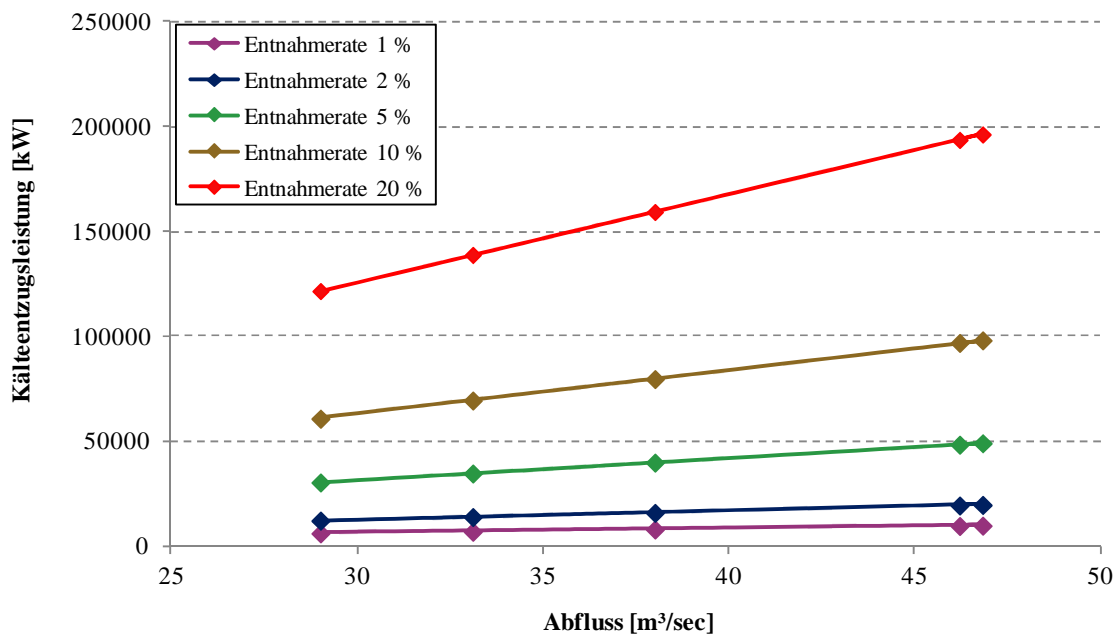


Abbildung 43: Potentielle Kälteentzugsleistung für verschiedene Entnahmeraten des jeweiligen Niedrigwasserabflusses für $T_{\text{mittel Sommer}}$ im Flussabschnitt Ulm

In Tabelle 13 sind alle weiteren berechneten Kühlleistungen aufgeführt. Hierbei fällt auf, dass alle Werte für den NQ 2 höher sind als die des MNQ. Der Grund dafür liegt in den Abflussausgangsdaten des LUBW, in denen der MNQ kleiner ist als der NQ 2. Realistisch gesehen ist das nicht verständlich. Dieser Fehler kann an dem vom LUBW verwendeten statistischen Modell liegen, das der Berechnung der Niedrigwasserabflüsse zu Grunde liegt. Der Fehler ist aber relativ gering und außerdem ist es in dieser Arbeit mehr das Ziel, einen generellen Überblick über die Leistungsmöglichkeiten zu erhalten, sodass dieser kleine Fehler nicht ins Gewicht fällt und damit ignoriert werden kann.

Ergebnisse der Mischwassertemperaturberechnung und der Berechnung der potentiellen Entzugsleistung für die Flussabschnitte Heilbronn und Ulm

Tabelle 13: Potentielle Kälteentzugsleistung für verschiedene Entnahmeraten des jeweiligen Niedrigwasserabflusses für T_{Max} , $T_{mittel Sommer}$ und $T_{mittel jährl. Max}$ im Flussabschnitt Ulm

Entnahme [%]		Kälteentzugsleistung [kW]				
		MNQ	NQ 2	NQ 5	NQ 10	NQ 20
T_{Max}	1	5333	5405	4387	3822	3349
	2	10667	10810	8774	7643	6697
	5	26667	27024	21936	19109	16743
	10	53333	54049	43871	38217	33486
	20	106667	108097	87743	76434	66972
$T_{mittel jährl. Max}$	1	9697	9827	7977	6949	6088
	2	19394	19654	15953	13897	12177
	5	48485	49135	39883	34743	30442
	10	96970	98270	79766	69486	60884
	20	193939	196541	159532	138972	121768
$T_{mittel Sommer}$	1	9697	9827	7977	6949	6088
	2	19394	19654	15953	13897	12177
	5	48485	49135	39883	34743	30442
	10	96970	98270	79766	69486	60884
	20	193939	196541	159532	138972	121768

Im Vergleich zum Flussabschnitt Heilbronn kälteren Flussabschnitt Ulm können im Sommer für jedes der drei Temperaturszenarien relativ hohe Kühlleistungen erzielt werden. Diese sind zum Vergleich untereinander in Abbildung 44 für die Entnahmeraten 1 % und 5 % des MNQ dargestellt. Bei der Berechnung mit $T_{mittel Sommer}$ bzw. $T_{mittel jährl. Max}$ ergeben sich identische Kälteentzugsleistungen, da bei beiden Szenarien die maximale Temperaturspreizung von 5 K erreicht wird und damit die maximale Kälteentzugsleistung erzielt werden kann. Deshalb liegen die Leistungslinien dieser beiden Temperaturszenarien aufeinander, wodurch nur die Leistungslinien für $T_{mittel Sommer}$ und T_{Max} sichtbar sind. Unabhängig vom Temperaturszenario können hier aber relativ hohe Kälteentzugsleistungen erreicht werden.

Ergebnisse der Mischwassertemperaturberechnung und der Berechnung der potentiellen Entzugsleistung für die Flussabschnitte Heilbronn und Ulm

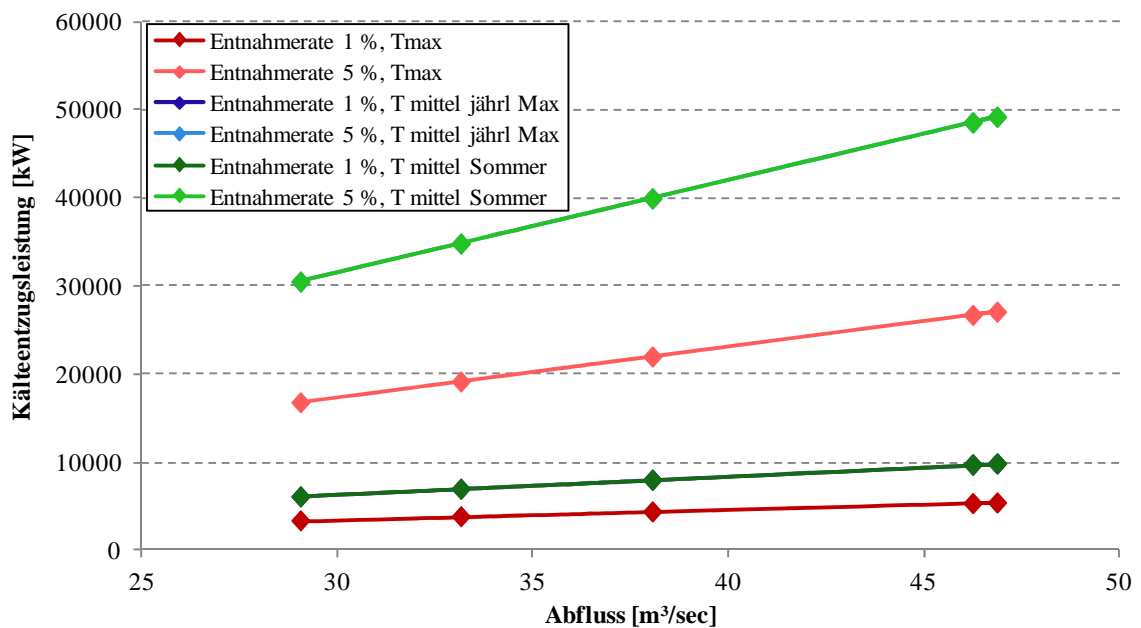


Abbildung 44: Vergleich des Leistungsangebots im Sommer für Entnahmeraten von 1% und 5% des MNQ für T_{Max} , $T_{mittel\ jährl\ Max}$ und $T_{mittel\ Sommer}$ im Flussabschnitt Ulm

Ebenso ist aus Abbildung 45 die identische Kälteentzugsleistung bei der Berechnung mit $T_{mittel\ Sommer}$ bzw. $T_{mittel\ jährl.\ Max}$ ersichtlich, da beide Leistungslinien wieder aufeinander liegen und deshalb nur die Leistungslinie von $T_{mittel\ jährl.\ Max}$ sichtbar ist. Diese beträgt für die beiden beschriebenen Szenarien 9697 kW bei einer Entnahme von 1 % des MNQ. Aber auch bei der Berechnung mit der absoluten Maximaltemperatur ist in diesem Bereich eine Kühlleistung von bis zu 5333 kW bei einer Entnahme von 1 % des MNQ möglich. Für die Darstellung der Abbildung 45 gelten die gleichen Verständniserklärungen wie für Abbildung 37.

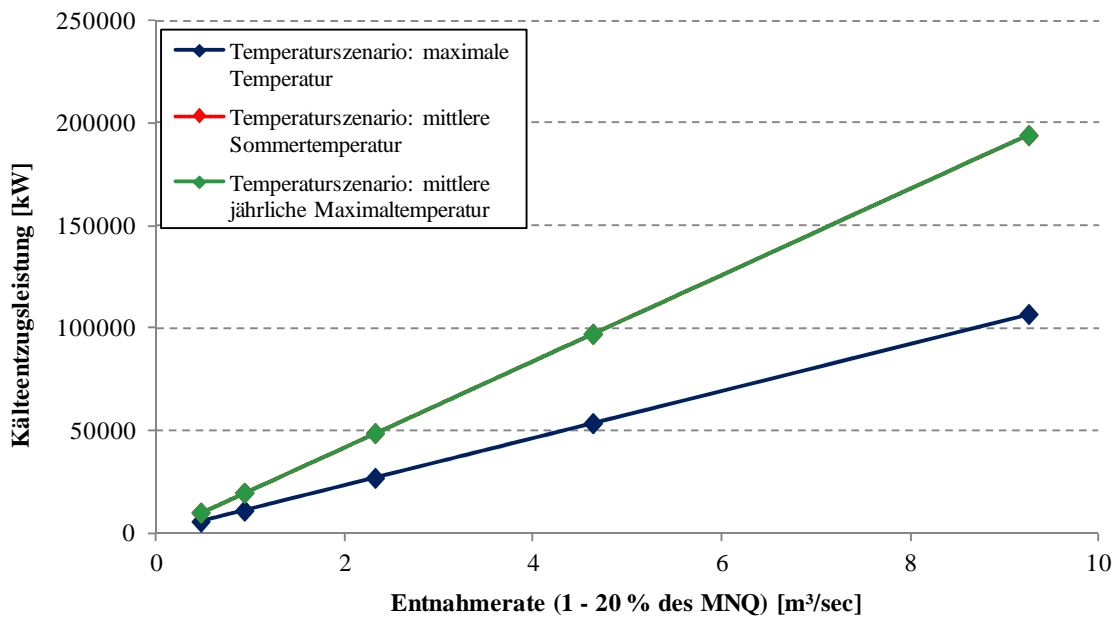


Abbildung 45: Vergleich des Leistungsangebots im Sommer für verschiedene Entnahmeraten des MNQ für T_{max} , $T_{mittel Sommer}$ und $T_{mittel jährl. Max}$ im Flussabschnitt Ulm

7.3.2.2 Wärmeentzugsleistung im Flussabschnitt Ulm

Für den Heizfall sind im Flussabschnitt Ulm weniger gute Bedingungen als im Flussabschnitt Heilbronn gegeben. Wie aus Abbildung 46 und 47 zu entnehmen ist, ist die absolute Minimaltemperatur T_{Min} des Wassers sowie die mittlere jährliche Minimaltemperatur kleiner als $2\text{ }^{\circ}\text{C}$, was dazu führt, dass das Donauwasser nicht weiter abgekühlt werden kann und damit keine Nutzung zum Heizen möglich ist. Hingegen ist nach der Berechnung mit der mittleren Wintertemperatur generell ein Wärmeentzug, wie in Abbildung 48 dargestellt, möglich.

Ergebnisse der Mischwassertemperaturberechnung und der Berechnung der potentiellen Entzugsleistung für die Flussabschnitte Heilbronn und Ulm

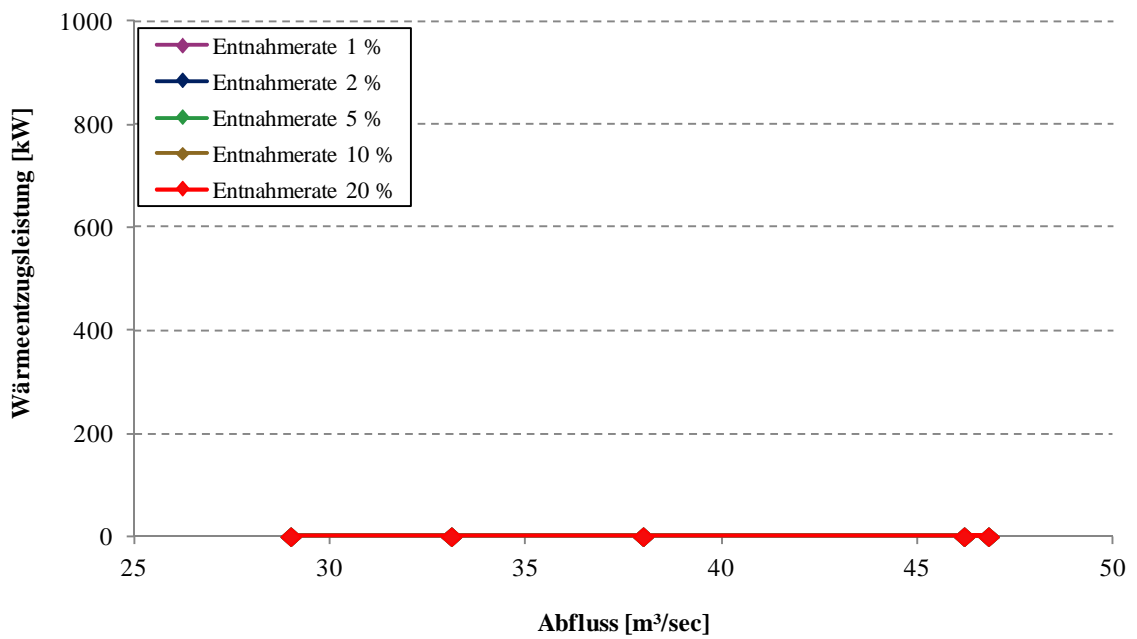


Abbildung 46: Potentielle Wärmeentzugsleistung für verschiedene Entnahmeraten des jeweiligen Niedrigwasserabflusses für T_{Min} im Flussabschnitt Ulm

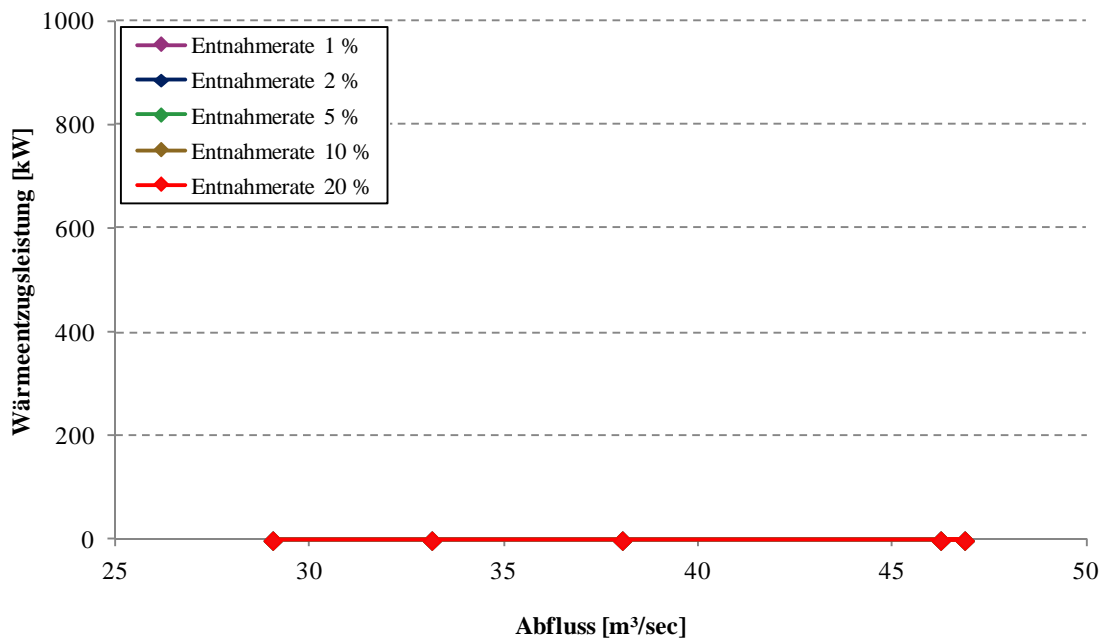


Abbildung 47: Potentielle Wärmeentzugsleistung für verschiedene Entnahmeraten des jeweiligen Niedrigwasserabflusses für $T_{mittel\ jährl.\ Min}$ im Flussabschnitt Ulm

Ergebnisse der Mischwassertemperaturberechnung und der Berechnung der potentiellen Entzugsleistung für die Flussabschnitte Heilbronn und Ulm

Nur bei der Berechnung der Wärmeentzugsleistung unter Verwendung von $T_{\text{mittel Winter}}$ ist generell im Flussabschnitt Ulm eine Nutzung möglich, wie Abbildung 48 zu entnehmen ist. Die potentielle Wärmeentzugsleistung liegt bei einer Entnahme von 1 % des NQ 2 bei 5700 kW, bei einer Entnahme von 5 % beträgt die mögliche Entzugsleistung 28498 kW. Minimal kann 3531 kW Wärmeentzugsleistung bei einer Entnahme von 1 % des NQ 20 und maximal 113994 kW Wärmeentzugsleistung bei einer theoretischen Entnahme von 20 % des NQ 2 erreicht werden.

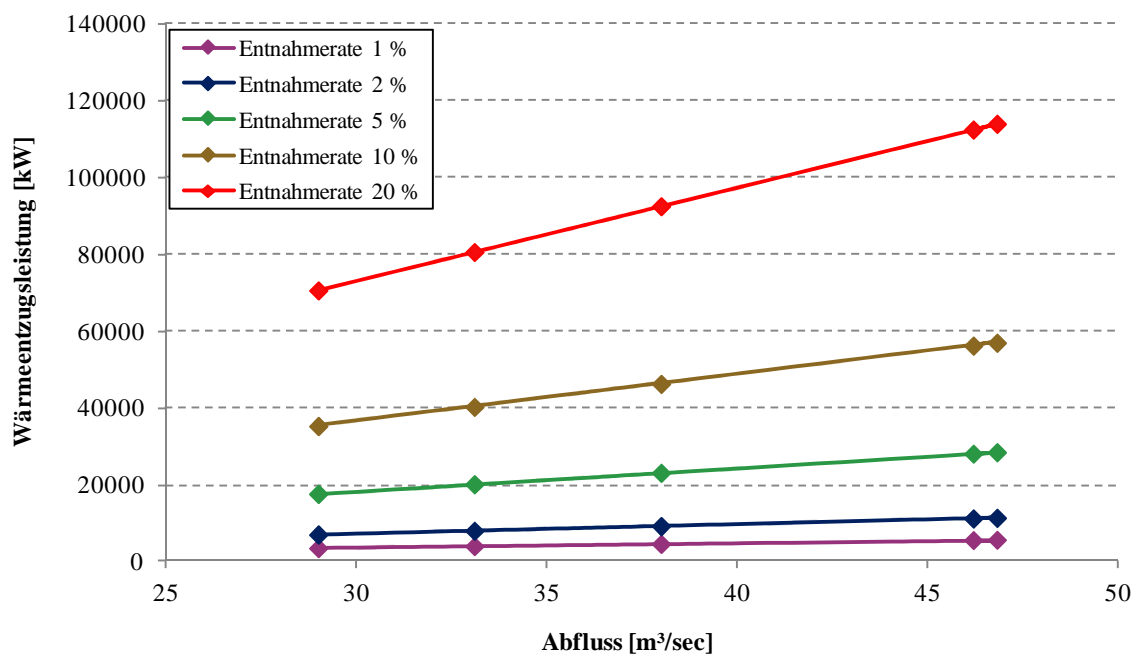


Abbildung 48: Potentielle Wärmeentzugsleistung für verschiedene Entnahmeraten des jeweiligen Niedrigwasserabflusses für $T_{\text{mittel Winter}}$ im Flussabschnitt Ulm

Die berechneten Werte für die Entzugsleistung für den Heizfall für den Flussabschnitt Ulm sind in Tabelle 14 aufgeführt. Dabei ist die Entzugsleistung für den NQ 2 generell wieder höher als für den MNQ. Die Erklärung dafür ist bereits in der Beschreibung der Tabelle 13 enthalten, daher wird hier nicht noch einmal darauf eingegangen.

Ergebnisse der Mischwassertemperaturberechnung und der Berechnung der potentiellen
Entzugsleistung für die Flussabschnitte Heilbronn und Ulm

Tabelle 14: Potentielle Wärmeentzugsleistung für verschiedene Entnahmeraten des jeweiligen Niedrigwasserabflusses für T_{Min} , $T_{\text{mittel Winter}}$ und $T_{\text{mittel jährl. Min}}$ im Flussabschnitt Ulm

		Wärmeentzugsleistung [kW]				
		MNQ	NQ 2	NQ 5	NQ 10	NQ 20
T_{Min}	Entnahme [%]					
	1	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	0
	5	0	0	0	0	0
	10	0	0	0	0	0
$T_{\text{mittel jährl. Min}}$	20	0	0	0	0	0
	1	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	0
	5	0	0	0	0	0
	10	0	0	0	0	0
$T_{\text{mittel Winter}}$	20	0	0	0	0	0
	1	5624	5700	4626	4030	3531
	2	11248	11399	9253	8060	7063
	5	28121	28498	23132	20151	17656
	10	56242	56997	46264	40302	35313
	20	112485	113994	92529	80603	70625

Auch hier sind in Abbildung 49 zum Vergleich die Leistungslinien der verschiedenen Temperaturszenarien und einer Entnahmerate von 1 % und 5 % dargestellt. Jedoch betragen, wie bereits beschrieben, die Wärmeentzugsleistungen für die Temperaturszenarien T_{Min} und $T_{\text{mittel jährl. Min}}$ 0 kW, sodass diese vier Leistungslinien aufeinander liegen und nur eine Leistungslinie sichtbar ist. Jedoch wird eine relativ hohe Wärmeentzugsleistung für die mittlere Wintertemperatur erzielt.

Ergebnisse der Mischwassertemperaturberechnung und der Berechnung der potentiellen Entzugsleistung für die Flussabschnitte Heilbronn und Ulm

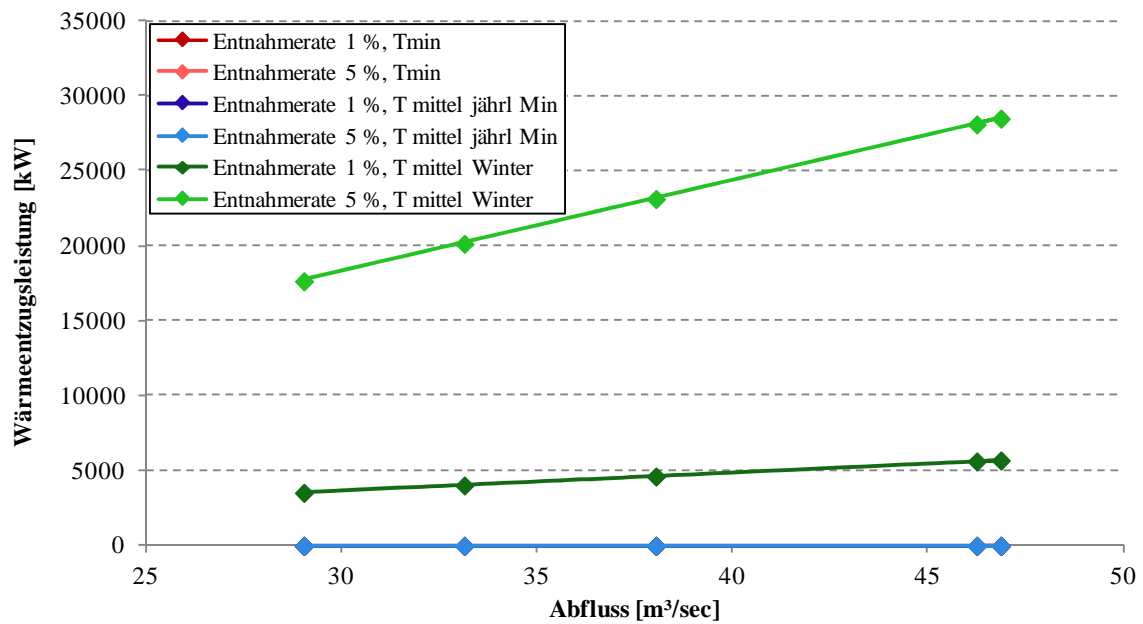


Abbildung 49: Vergleich des Leistungsangebots im Winter für Entnahmeraten von 1% und 5% des MNQ für T_{Min} , $T_{mittel\ jährl\ Min}$ und $T_{mittel\ Winter}$ im Flussabschnitt Ulm

Abbildung 50 zeigt ebenso eine vergleichende Darstellung der Wärmeentzugsleistungen für die verschiedenen Entnahmemengen. Hier liegen aber wieder die vier Leistungslinien der Berechnungen mit T_{Min} sowie der $T_{mittel\ jährl\ Min}$ aufeinander, sodass nur eine dieser Leistungslinien sichtbar ist. Für die Berechnung mit $T_{mittel\ Winter}$ ergibt sich hingegen eine Wärmeentzugsleistung von 5700 kW bei einer Entnahmerate von 1 % des NQ 2 und 113994 kW bei einer theoretischen Entnahmerate von 20 % des NQ 2.

Ergebnisse der Mischwassertemperaturberechnung und der Berechnung der potentiellen Entzugsleistung für die Flussabschnitte Heilbronn und Ulm

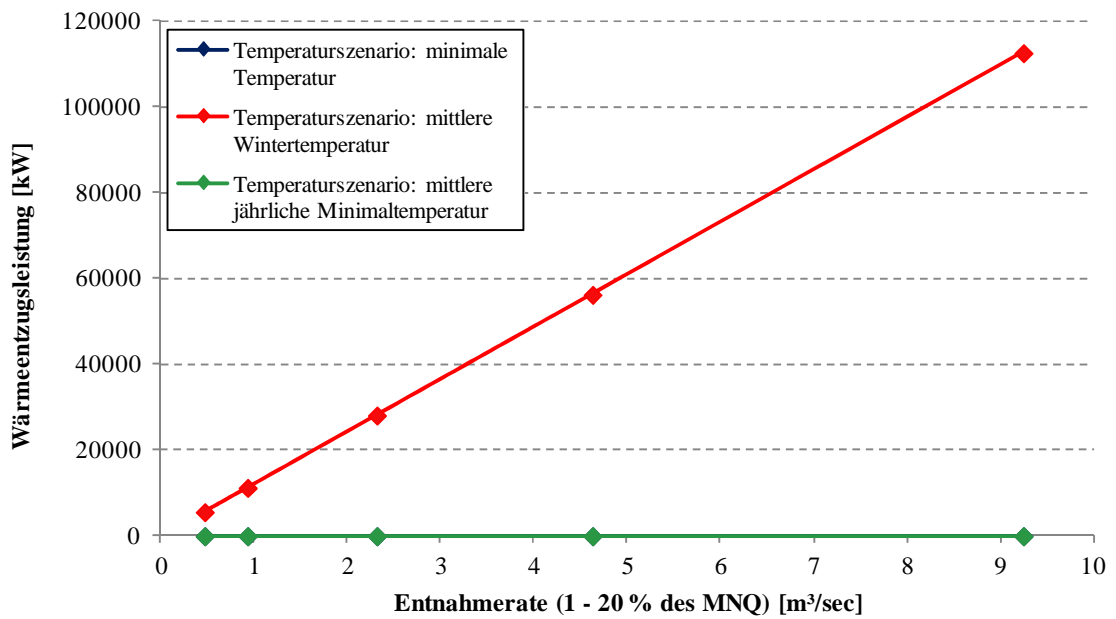


Abbildung 50: Vergleich des Leistungsangebots im Winter für verschiedene Entnahmeraten des MNQ für T_{Min} , $T_{mittel Winter}$ und $T_{mittel jährl. Min}$ im Flussabschnitt Ulm

7.3.2.3 Saisonales Leistungsangebot im Flussabschnitt Ulm

Beim Flussabschnitt Ulm liegt das Leistungsmaximum im Sommer, da die Temperatur durchschnittlich niedriger ist als im Flussabschnitt Heilbronn. In Abbildung 51 ist der Verlauf des potentiellen Leistungsangebots über das Jahr hinweg für jeden Monat dargestellt. Hier ist der Jahresverlauf genau umgekehrt zu dem des Flussabschnittes Heilbronn, d.h. das größte Leistungspotential liegt im Sommer und im Winter sinkt die potentielle Wärmeentzugsleistung deutlich.

Ergebnisse der Mischwassertemperaturberechnung und der Berechnung der potentiellen Entzugsleistung für die Flussabschnitte Heilbronn und Ulm

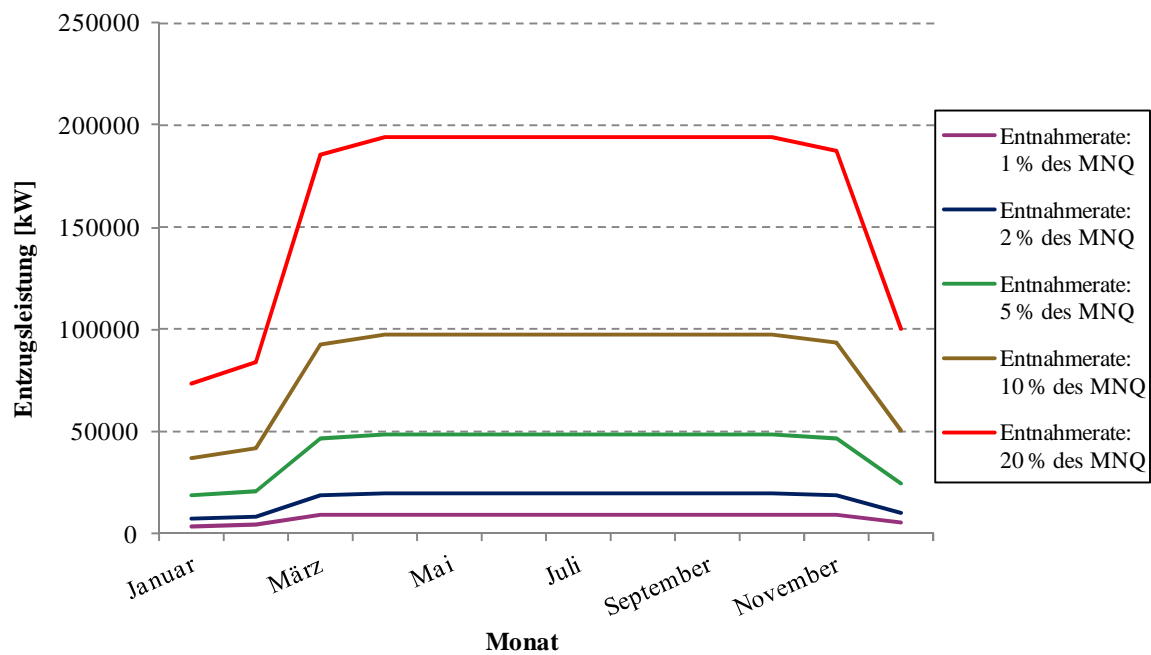


Abbildung 51: Jahresverlauf des potentiellen Leistungsangebots für verschiedene Entnahmeraten des MNQ im Flussabschnitt Ulm

Abbildung 52 und Abbildung 53 zeigen die Leistungspotentiale jeweils für die Heiz- bzw. Kühlperiode. Im Winter wird nur in den Übergangsmonaten Oktober und April die maximale Heizleistung erreicht. In allen anderen Monaten von November bis März kann aufgrund der niedrigen Wassertemperatur das Wasser nur eingeschränkt als Wärmequelle genutzt werden. Das Minimum liegt im Januar, wo 3689 kW bei einer Entnahmemenge von 1 % des MNQ gewonnen werden können. Das Maximum an Wärmeentzugsleistung liegt bei gleichen Bedingungen bei 9697 kW. Ebenso beträgt die maximale Kühlleistung, die im Sommer durchgehend erzielt werden kann, wie in Abbildung 32 dargestellt, 9697 kW bei einer Entnahmerate von 1 % des MNQ. Bei höheren Entnahmeraten erhöht sich die Wärmeentzugsleistung entsprechend.

Ergebnisse der Mischwassertemperaturberechnung und der Berechnung der potentiellen Entzugsleistung für die Flussabschnitte Heilbronn und Ulm

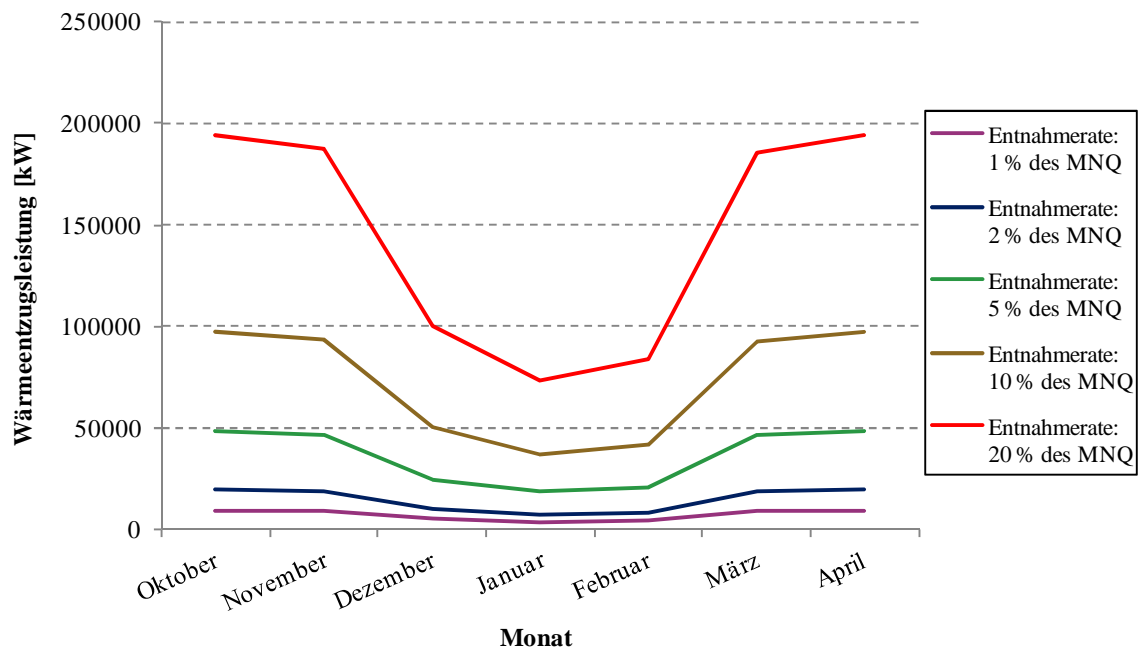


Abbildung 52: Verlauf des Leistungsangebots im Winter für verschiedene Entnahmeraten des MNQ im Flussabschnitt Ulm

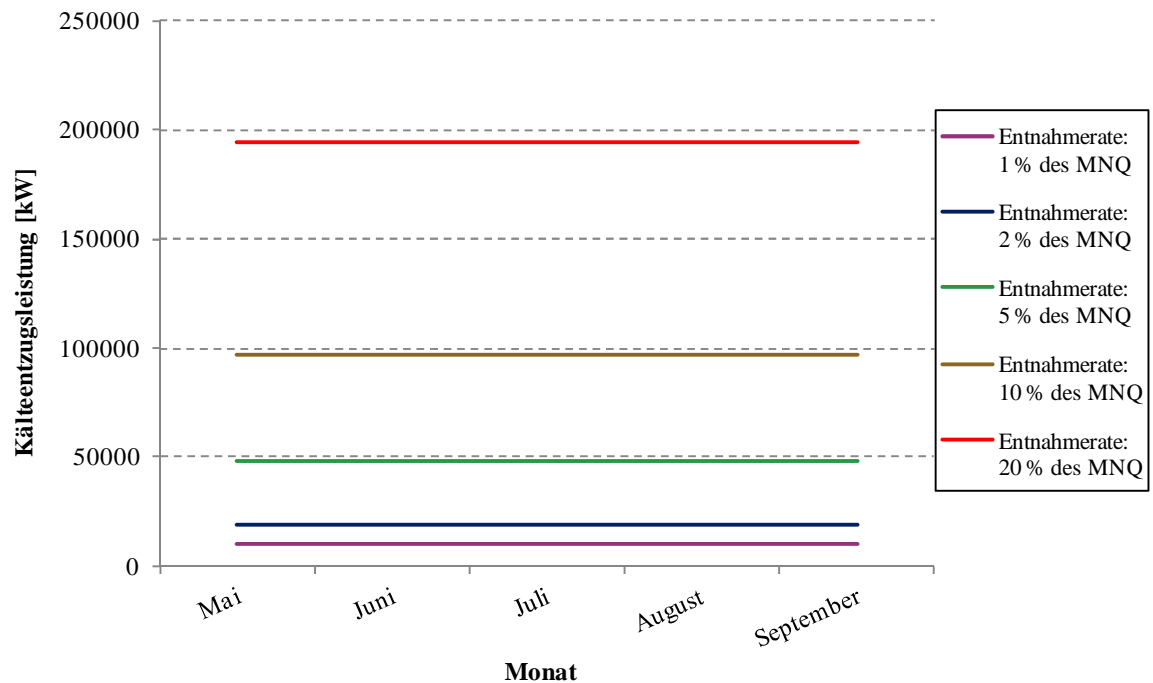


Abbildung 53: Verlauf des Leistungsangebots im Sommer für verschiedene Entnahmeraten des MNQ im Flussabschnitt Ulm

Ergebnisse der Mischwassertemperaturberechnung und der Berechnung der potentiellen Entzugsleistung für die Flussabschnitte Heilbronn und Ulm

In Tabelle 15 sind alle berechneten Heiz- und Kühlleistungen für die einzelnen Monate aufgeführt. Hier sind ebenso wie bei Tabelle 12 die Wintermonate, in denen Wärmeentzugsleistung betrachtet wird mit rot und die Sommermonate von Mai bis September, in denen Kälteentzugsleistung benötigt wird mit blau gekennzeichnet. Diese Werte reichen von 3689 kW Heizleistung bei einer Entnahme von 1 % des MNQ im Januar bis zu 193939 kW bei einer theoretischen Entnahme von 20 % des MNQ als Heizleistung im April und Oktober. Der gleiche Wert von 193939 kW ergibt sich als maximale Kühlleistung für alle Sommermonate. Minimal kann im Sommer 9697 kW an Kälteentzugsleistung bei einer Entnahmerate von 1 % des MNQ gewonnen werden.

Tabelle 15: Monatliches Leistungsangebot für verschiedene Entnahmeraten des MNQ im Flussabschnitt Ulm

Entnahme [%]	Monatliches Leistungspotential [kW]				
	1	2	5	10	20
Januar	3689	7379	18447	36893	73787
Februar	4177	8354	20886	41772	83545
März	9264	18529	46322	92644	185287
April	9697	19394	48485	96970	193939
Mai	9697	19394	48485	96970	193939
Juni	9697	19394	48485	96970	193939
Juli	9697	19394	48485	96970	193939
August	9697	19394	48485	96970	193939
September	9697	19394	48485	96970	193939
Oktober	9697	19394	48485	96970	193939
November	9365	18731	46827	93655	187310
Dezember	5011	10023	25057	50115	100229

8. Bewertung der Ergebnisse

8.1 Bewertung der Flussabschnitte Heilbronn und Ulm

Die beispielhaft gewählten Flussabschnitte Heilbronn und Ulm weisen sehr unterschiedliche Eigenschaften auf. Dies lässt sich größtenteils auf die jeweiligen Wassertemperaturen zurückführen, d.h. die Temperaturen bestimmen, ob eine Nutzung möglich ist und in welcher Größenordnung die Entzugsleistungen liegen. Die Abflusswerte und damit die wirklichen Entnahmemengen wirken sich nur auf die maximale Entzugsleistung aus. Bei den gewählten Flussabschnitten sind die Abflüsse so groß (MNQ Heilbronn: 28,95 m³/sec; MNQ Ulm: 46,22 m³/sec), dass die Entnahmemengen und dadurch die Entzugsleistungen ebenfalls sehr hoch sind, vorausgesetzt die Flusstemperaturen lassen eine uneingeschränkte Nutzung zu.

Für den Flussabschnitt Heilbronn lässt sich zusammenfassend sagen, dass die Wassertemperaturen des Neckars generell hoch sind. Daher ist im Sommer für die Berechnung nach T_{Max} keine Kälteentzugsleistung möglich. Für die beiden anderen Temperaturszenarien $T_{\text{mittel jährl. Max}}$ und $T_{\text{mittel Sommer}}$ sind aber dennoch mittlere bis hohe Entzugsleistungen möglich.

Im Winter können dagegen bei allen Temperaturszenarien hohe Wärmeentzugsleistungen erzielt werden. Betrachtet man die Leistungswerte die nach den monatlichen Temperaturwerten berechnet werden, so kann im Winter durchgehend eine maximale Leistung erreicht werden. Im Sommer fällt die Entzugsleistung und beträgt am Minimum im August aber noch mehr als 50 % des Maximums.

Der Flussabschnitt Ulm besitzt mit dem kälteren Donauwasser sehr gute Voraussetzungen zur Kühlung im Sommer. Bei Verwendung aller drei Temperaturszenarien ist eine jeweils sehr hohe Entzugsleistung möglich. Bei den Szenarien $T_{\text{mittel jährl. Max}}$ und $T_{\text{mittel Sommer}}$ wäre, bezogen auf die Maximaltemperatur von 25 °C des gesamten Flusswassers, eine noch höhere Entzugsleistung möglich, jedoch würde dann der Grenzwert der maximalen Temperaturspreizung von 5 K im WP-Kreislauf überschritten. Hingegen im Winter ist nur für das Temperaturszenario $T_{\text{mittel Winter}}$ eine Wärmeentzugsleistung möglich, die dann aber wieder einen großen Wert besitzt. Die

monatlichen Entzugsleistungen variieren stärker als im Flussabschnitt Heilbronn. Den gesamten Sommer über kann die maximale Kälteentzugsleistung erreicht werden, im Winter beim Minimum im Januar beträgt die Wärmeentzugsleistung nur noch knapp über ein Drittel des Maximums. Die generell höheren absoluten Leistungswerte im Flussabschnitt Ulm können auf den höheren Abfluss im Gegensatz zum Flussabschnitt Heilbronn zurückgeführt werden.

8.2 Bewertung der verschiedenen Temperaturszenarien

Wie bereits beschrieben, werden je drei Temperaturszenarien für die Heiz- bzw. Kühlperiode berechnet, auf deren Grundlage anschließend die Potentialkarten von Baden-Württemberg erstellt worden ist. Diese Temperaturszenarien sind eine absolute Extremtemperatur über die ganze Messreihe (T_{Min} , T_{Max}), eine mittlere jährliche Extremtemperatur aus den jährlichen Extremtemperaturen ($T_{\text{mittel jährl. Min}}$, $T_{\text{mittel jährl. Max}}$) und eine mittlere Temperatur aus den Monatswerten einer Kühl- bzw. Heizperiode ($T_{\text{mittel Winter}}$, $T_{\text{mittel Sommer}}$). Weiterhin wurde für jeden einzelnen Monat eine Mitteltemperatur ($T_{\text{mittel Monat}}$) berechnet, um dadurch eine monatspezifische Entzugsleistung berechnen zu können.

8.2.1 Bewertung absolute Extremtemperatur

Bei der absoluten Extremtemperatur (T_{Min} , T_{Max}) ist zu beachten, dass bei der Datengrundlage die Messreihen in der Aufzeichnungsdauer sehr unterschiedlich sind. Manche Messreihen reichen nur über einige wenige Jahre, andere über 20 Jahre. Die Wahrscheinlichkeit ist bei langen Messreihen größer, dass ein Extremereignis stattfindet und somit eine sehr niedrige bzw. hohe Wassertemperatur zur Berechnung der nutzbaren Leistung verwendet wird. In einem benachbarten Flussabschnitt, in dem aufgrund einer kürzeren Messreihe dieses Extremereignis nicht aufgezeichnet wird, kann hingegen eine höhere bzw. niedrigere Wassertemperatur vorliegen. Somit ist für die Berechnung der potentiellen Leistung die absolute Maximal- bzw. Minimaltemperatur des Oberflächenwassers nicht als plausibel zu erachten, da dies ein absolutes „worst-case-Szenario“ darstellt, was nicht für die Bewertung einer durchschnittlichen Nutzung herangezogen werden kann. Eine vergleichsweise kurze extreme Wetterperiode könnte in

diesem Fall eine Nutzung komplett verhindern, obwohl auf längere Sicht gesehen die Wassertemperaturen eine gute Kühl- bzw. Heizleistung zulassen würden. Dies spiegelt sich auch in den Abbildungen B2 und B5 in Anhang B. In den meisten Flussabschnitten ist nach diesen Potentialkarten gar keine oder nur eine geringe Entzugsleistung möglich. Somit kann eine WP-Anlage mit der Wärme- bzw. Kältequelle Oberflächenwasser normalerweise nicht monovalent betrieben werden. Dies bedeutet, dass eine zweite Alternativanlage installiert werden muss, um die Versorgungssicherheit bei Extremereignissen sicherzustellen. Bei den meisten beschriebenen Praxisbeispielen sind für diesen Fall Gas- oder Elektroheizkessel installiert.

8.2.2 Bewertung mittlere jährliche Extremtemperatur

Um ein realistisches „worst-case-Szenario“ für jede Heiz- bzw. Kühlperiode zu erstellen, könnte man die mittlere jährliche Extremtemperatur ($T_{\text{mittel jährl. Max}}$, $T_{\text{mittel jährl. Min}}$) heranziehen. Diese zeigt an, auf welche Temperatur sich das Wasser durchschnittlich in einem Jahr maximal abkühlt bzw. aufheizt. Somit werden die jährlich zu erwartenden durchschnittlichen Minimalentzugsleistungen gut beschrieben, ohne dass ein einziges Extremwetterereignis eine Nutzung komplett verhindern würde. Die entsprechenden thermischen Potentialkarten B3 und B6 in Anhang B zeigen noch relativ hohe mögliche Entzugsleistungen. Damit kann gezeigt werden, welche Entzugsleistung bei der größten Wärme- bzw. Kältenachfrage im Gebäude noch möglich ist, denn bei den kältesten Außentemperaturen wird die größte Heizleistung und umgekehrt bei den höchsten Außentemperaturen die größte Kühlleistung im Gebäude verlangt. Auf Grundlage dieser Berechnung könnte dann eine ergänzende Heiz- bzw. Kühlquelle dimensioniert werden, die dann in diesen Spitzenlastzeiten einspringen kann.

8.2.3 Bewertung mittlere Sommer- bzw. Wintertemperatur

Um die mittlere Leistungsfähigkeit des Oberflächengewässers zu beschreiben, ist die Berechnung mit Hilfe der mittleren Sommer- bzw. Wintertemperatur ($T_{\text{mittel Sommer}}$, $T_{\text{mittel Winter}}$) am Besten geeignet. Bei dieser Berechnung wird aus den jeweiligen Sommer- bzw. Wintermonaten eine durchschnittliche Wassertemperatur berechnet. Unter Verwendung dieser Daten errechnet sich immer die größtmögliche nutzbare Leistung,

jeweils für den Kühl- als auch für den Heizfall. Nach dieser Berechnung wird der Einfluss der Extremtemperaturen abgeschwächt und damit eine größere Leistung für diese Zeiten der extremen Wassertemperaturen angegeben, als tatsächlich möglich. Diese treten normalerweise im Hochsommer und im Winter im Januar oder Februar auf. Für die Erstellung der Potentialkarte ist aber lediglich ein Überblick über die generelle Möglichkeit der Nutzung und der groben Größenordnungen dieser Nutzung von Bedeutung. Deshalb hat dies, obwohl nicht optimal, keine schwerwiegenden Falscheinschätzungen zur Folge. Die entsprechenden Potentialkarten B4 und B7 sind in Anhang B aufgeführt. Dagegen wird in den Übergangsmonaten die Leistungsfähigkeit bei dieser Berechnung unterschätzt. Darüber hinaus sind die Messreihen z.T. nicht sehr aktuell, d.h. es werden auch Daten verwendet, die 10 oder mehr Jahre alt sind.

8.2.4 Bewertung mittlere Monatstemperatur

Um die Leistungsfähigkeit eines Oberflächengewässers zu beschreiben ist die genaueste Methode die monatlichen Temperaturwerte zur Berechnung der Entzugsleistung heranzuziehen. Dafür wird von jedem Flussabschnitt ein Mittelwert der jeweiligen Wassertemperatur spezifisch für jeden Monat berechnet. Somit gibt es für jeden Flussabschnitt 12 Monatswerte für die Entzugsleistung. Damit wäre eine kartografische Darstellung nur mittels 12 verschiedener Karten realisierbar, was sehr umständlich und unübersichtlich wäre. In einer Gesamtpotentialkarte ist solch eine Darstellung nicht möglich. Generell kann aber aus diesen Daten am Besten die reelle Kühl- bzw. Heizleistung für jeden Monat bestimmt werden und somit für die Umsetzung in realen Projekten benutzt werden. Für jeden Flussabschnitt kann entsprechend den monatlichen Gebäudeanforderungen verglichen werden, ob die Kühl- oder Heizleistung alleine durch das Gewässer gedeckt werden kann, oder ob nur ein bestimmter Teil abgedeckt werden kann und damit eine parallel laufende, unterstützende Heiz- bzw. Kühlquelle installiert werden müsste.

8.2.5 Vergleich $T_{\text{mittel Sommer/Winter}}$, $T_{\text{mittel jährlich Max/Min}}$, $T_{\text{Max/Min}}$ und mittlere Monatstemperatur

In diesem Abschnitt sollen die Berechnungen der Leistung basierend auf den verschiedenen Temperaturszenarien gegenübergestellt und ihre Vor- und Nachteile dargestellt werden. In Tabelle 16 sind die Vor- und Nachteile der unterschiedlichen verwendeten Temperaturszenarien zusammengestellt.

Tabelle 16: Vor- und Nachteile der einzelnen verwendeten Temperaturszenarien

Temperaturszenario	Vorteile	Nachteile
$T_{\text{Max}}; T_{\text{Min}}$	Information über mögliches "worst-case-Szenario"	potentielle Leistungen werden durch möglicherweise nur ein Extremereignis unterschätzt
$T_{\text{mittel jährl. Max}};$ $T_{\text{mittel jährl. Min}}$	guter Anhaltspunkt, um reelle Leistungsuntergrenzen zu erkennen und einzuplanen	unterschätzt die Durchschnittsleistung in den Übergangsmontaten und außerhalb der Zeiten extremer Temperaturen
$T_{\text{mittel Sommer}};$ $T_{\text{mittel Winter}}$	gibt gut die durchschnittliche Leistung einer ganzen Kühl- bzw. Heizperiode an	überschätzt die Leistung bei den maximalen und minimalen Temperaturen
$T_{\text{monatlich}}$	am Besten geeignet zur Identifikation der zu erwartenden monatlichen Leistung	Darstellung in einer Gesamtpotentialkarte nicht möglich

9. Schlussfolgerungen

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die thermische Nutzung von Oberflächengewässern ein noch ziemlich unerforschter und ungenutzter Bereich ist. Nur sehr vereinzelt gibt es bereits Anlagen, die die Wärmequelle Oberflächengewässer nutzen. Das Potential für eine Steigerung dieser Anlagen steht aber zur Verfügung. Wie aus den erstellten Potentialkarten ersichtlich ist, besitzen die Hauptgewässer in Baden-Württemberg größtenteils ein sehr großes Leistungspotential. Diese Potentialkarten können als Orientierungshilfe für Planungen von neuen Anlagen verwendet werden, da daraus die Größenordnung des potentiellen Entzugsleistungsangebots für einen bestimmten Flussabschnitt abgeleitet werden kann. Ausgehend von diesen Angaben kann anschließend entschieden werden, wie die Anlage zu planen ist. Für die grundsätzliche Nutzung der Oberflächengewässer ist zu erwähnen, dass hauptsächlich die Wassertemperaturen als die limitierende Eigenschaft des Gewässers zu sehen sind. Zu niedrige oder zu hohe Wassertemperaturen können dazu führen, dass die Nutzung nur stark eingeschränkt oder gar nicht möglich ist. Hingegen ist das Abflussvolumen die Größe, die, falls eine Nutzung möglich ist, die Größenordnung dieser Nutzung bestimmt. In den Potentialkarten sind nur die Hauptgewässer Baden-Württembergs behandelt, jedoch ließe das Abflussvolumen der Oberflächengewässer in vielen kleineren Gewässern ebenso eine thermische Nutzung zu. Ein Mangel für die Planung solcher Anlagen ist, dass von gesetzlicher Seite in Deutschland keine konkreten Vorgaben vorhanden sind. Dadurch sind die bisher genehmigten Anlagen lediglich durch Einzelfallregelungen der zuständigen Genehmigungsbehörde zu Stande gekommen.

In der Zukunft gibt es in dem Bereich der thermischen Nutzung von Oberflächengewässern noch viele Aufgaben zu bewältigen. So ist es von Bedeutung, eine weiterführende Untersuchung der Auswirkung der thermischen Nutzung auf die Oberflächenwassertemperaturen sowie der natürlichen thermischen Regeneration der Gewässer anzustreben. Ebenso wäre eine umfangreichere Aufzeichnung der Oberflächenwassertemperaturen erstrebenswert, um auch für kleinere Flüsse Berechnungen vornehmen zu können. Generell müsste die Oberflächenwassertemperatur und deren Verlauf über die Flusslänge besser untersucht werden. Dabei sind besonders

anthropogene Einflüsse entlang des Flusslaufs zu berücksichtigen. Von gesetzlicher Seite her wäre es erforderlich, konkrete Grenzwerte für die maximale Veränderung der Temperatur im Gesamtgewässer, maximale Entnahmemengen und maximal bzw. minimal erlaubte Gewässertemperaturen festzulegen. Als Vorbild könnte die Schweizer Gesetzgebung dienen, da es hier schon sehr klare Vorgaben mit konkreten Grenzwerten in Bezug auf zulässige Oberflächenwassermengen und -temperaturen gibt.

10. Quellenverzeichnis

Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL), Abteilung Wasserbau, Baudirektion
Kanton Zürich: Planungshilfe Wärme- Kältenutzung aus Flüssen und Seen,
abgerufen am 20.8.2012

Amt für Bundesbauten: Alternative Wärme aus der Limnat – ETH Zürich Wärmepumpe
Walche FHK – Reaktivierung + Ausbau, 1988

Aschwanden, H. & Kann, C.: Die Abflussmenge Q_{347} – Eine Standortbestimmung,
Hydrologische Mitteilungen, Nr. 27, Eidgenössisches Departement des Innern,
Landeshydrologie und -geologie, Bern, 1999

Baumgartner, E.; Bundesamt für Umwelt BAFU, Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Abteilung Hydrologie, Bern,
persönliche Kommunikation, 15.11.2012

BMU; www.bmu.de/binnengewasser/gewaesserschutzpolitik/europa/doc/3063.php;
zuletzt besucht 20.9.2012

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: Bundeswasserstraßengesetz
(WaStrG) in der Fassung der Bekanntmachung vom 23. Mai 2007; zuletzt geändert
am 6. Oktober 2011

Bundesumweltministerium: Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts
(Wasserhaushaltsgesetz – WHG) Vom 31.07.2009 (BGBl. I Nr. 51, S. 2585), 2009

Bundesumweltministerium: Verordnung über Anlagen zum Umgang mit
wassergefährdenden Stoffen (VAUwS), , Entwurf Stand 27.01.2012

Bundesverfassung (BV) der Schweizerischen Eidgenossenschaft vom 18. April 1999
(Stand am 11. März 2012)

- Bundesversammlung der Schweizerischen Eidgenossenschaft: Bundesgesetz über den Schutz der Gewässer (Gewässerschutzgesetz, GSchG) vom 24. Januar 1991 (Stand am 1. Januar 2011)
- Dahlmanns, H.; Verbandsgemeindeverwaltung Lauterecken, persönliche Kommunikation, 28.11.2012
- Egli, M.: Die Wärmepumpenheizung des zürcherischen Rathauses, Sonder-Abdruck aus dem Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, Jahrgang 1938, Heft 11,
A. G. Fachschriften Verlag & Buchdruckerei, Zürich, 1938
- Europäisches Parlament und der Rat: Richtlinie 2000/60/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik (WRRL), 2000
- FRANK GmbH: LIMNION LIMA-1 Wärme aus Seen und Flüssen; Produktbroschüre, 2012
- Gerdes, I.: Der Fluss schickt keine Energierechnung, EuroHeat&Power, 41. Jahrgang (2012), Heft 6, VWEV Energieverlag GmbH, Frankfurt am Main, 2012
- Hähnlein, S., Blum, P. & Bayer, P.: Oberflächennahe Geothermie – aktuelle rechtliche Situation in Deutschland; Grundwasser – Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie, Springer-Verlag Berlin - Heidelberg, 2011
- Kuchling, H.: Taschenbuch der Physik, 19. Auflage; Fachbuchverlag Leipzig in Carl Hanser Verlag, München, 2007
- Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW) Referat 43 – Hydrologie, Hochwasservorhersage in Zusammenarbeit mit dem Institut für Wasser- und Gewässerentwicklung (IWG) – Universität Karlsruhe Abteilung 4: Hydrologie: Abflusskennwerte in Baden-Württemberg, Mannheim, 2007

Landesanstalt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht (LUWG) Rheinland Pfalz; Messdaten: Pegel Lohnweiler/Gewässer: Lauter; <http://213.139.159.46/prj-wwvauskunft/projects/messstellen/wasserstand/register/1.jsp?msn=2546077000&dfue=0>; zuletzt besucht am 22.10.2012

Ligi, G.; Hochbauamt Kanton Zürich, Gebäudetechnik, persönliche Kommunikation, 16.02.2012

Loidl, Max; Patentinhaber maxloidlverfahren, persönliche Kommunikation, 6.12.2012; und: www.maxloidlverfahren.de/verfahren/; zuletzt besucht: 10.12.2012

Lugert, G.; FRANK GmbH Produktmanager Geothermie, persönliche Kommunikation, 3.12.2012

Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg: Wassergesetz für Baden-Württemberg (WG) Vom 20. Januar 2005 (BGI. S. 219) zuletzt geändert durch Artikel 41 der Verordnung vom 25. Januar 2012 (GBl. Nr. 3, S.65) in Kraft getreten am 28. Februar 2012

Ochsner, K.: Handbuch Wärmepumpen, 6. erweiterte Auflage, Eigenverlag, Linz, 2010

Regierungsrat des Kantons Zürich: Konzessionsverordnung zum Wasserwirtschaftsgesetz (KonzV WWG) vom 21. Oktober 1992

Rein, M.; Landratsamt Tübingen, persönliche Kommunikation, 4.12.2012

Rey, P. & Müller, E.: EU-Wasserrahmenrichtlinie und Schweizer Wasser- und Gewässerschutzgesetzgebung - eine Gegenüberstellung, Bundesamt für Umwelt (BAFU), 2007

Schweizerischer Bundesrat: Gewässerschutzverordnung (GSchV) vom 28. Oktober 1998 (Stand am 1. August 2011)

Struktur- und Genehmigungsdirektion Süd (SGD Süd), Regionalstelle Wasserwirtschaft, Abfallwirtschaft und Bodenschutz Kaiserslautern (RS WAB KL): Bescheid für die Entnahme und Wiedereinleitung von Flusswasser aus der Lauter zum Betrieb einer Nahwärmeversorgung in der Stadt Lauterecken, 2010

thermea. Energiesysteme GmbH; www.thermea.de/praxis/praxisbeispiel-lauterecken; zuletzt besucht am 15.11.2012

Tholen, M. & Walker-Hertkorn, S.: Arbeitshilfen Geothermie, wvgw Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, Bonn, 2007

Tiator, I. & Schenker, M.: Wärmepumpen – Wärmepumpenanlagen, Vogel Buchverlag, 2007

UBA; www.umweltbundesamt.de/wasser/themen/geweschr/bundeswasserrecht.htm; zuletzt besucht am 15.9.2012

Umweltministerium Baden-Württemberg (UM): Leitfaden zur Nutzung von von Erdwärme mit Grundwasserwärmepumpen für Ein- und Zweifamilienhäuser oder Anlagen mit Energieentzug bis zirka 45000 kWh pro Jahr, 2009

VDI-Richtlinie 4640 Blatt 1: Thermische Nutzung des Untergrundes – Grundlagen Genehmigungen, Umweltaspekte, 2000

Völkel, H.: Vulkansee als unerschöpflicher Energiespeicher, Forum Erneuerbare Energien (FEE), Heizungs-Journal Verlags GmbH, Winnenden, 2008

Völkel, H.; Buderus,; persönliche Kommunikation, 25.10.2012

weishaupt: Planungs- und Installationsbuch; Max Weishaupt GmbH, Schwendi, 2007

Zmarsly, E., Kuttler, W. & Pethe, H.: Meteorologisch-klimatologisches Grundwissen – Eine Einführung mit Übungen, Aufgaben und Lösungen, 3. neu bearbeitete Auflage, Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart, 2007

Quellenverzeichnis

Zogg, M.: Geschichte der Wärmepumpe - Schweizer Beiträge und internationale Meilensteine, Bundesamt für Energie, Bern, 2008

11. Anhang

Tabelle A1: Temperatur- und Abflusswerte der Flussabschnitte Heilbronn und Ulm

		Heilbronn	Ulm
Temperaturzenario [°C]	T _{Max}	28,6	22,0
	T _{mittel Sommer}	20,2	15,6
	T _{mittel jährl. Max}	24,0	19,0
	T _{Min}	1,1	0,1
	T _{mittel Winter}	7,8	4,9
	T _{mittel jährl. Min}	4,4	1,8
Niedrigwasser- abflussereignis [m ³ /sec]	MNQ	28,1	46,2
	NQ 2	27,4	46,8
	NQ 5	21,8	38,0
	NQ 10	19,1	33,1
	NQ 20	17,0	29,0



Abbildung B1: Übersichtskarte der Hauptgewässer von Baden-Württemberg

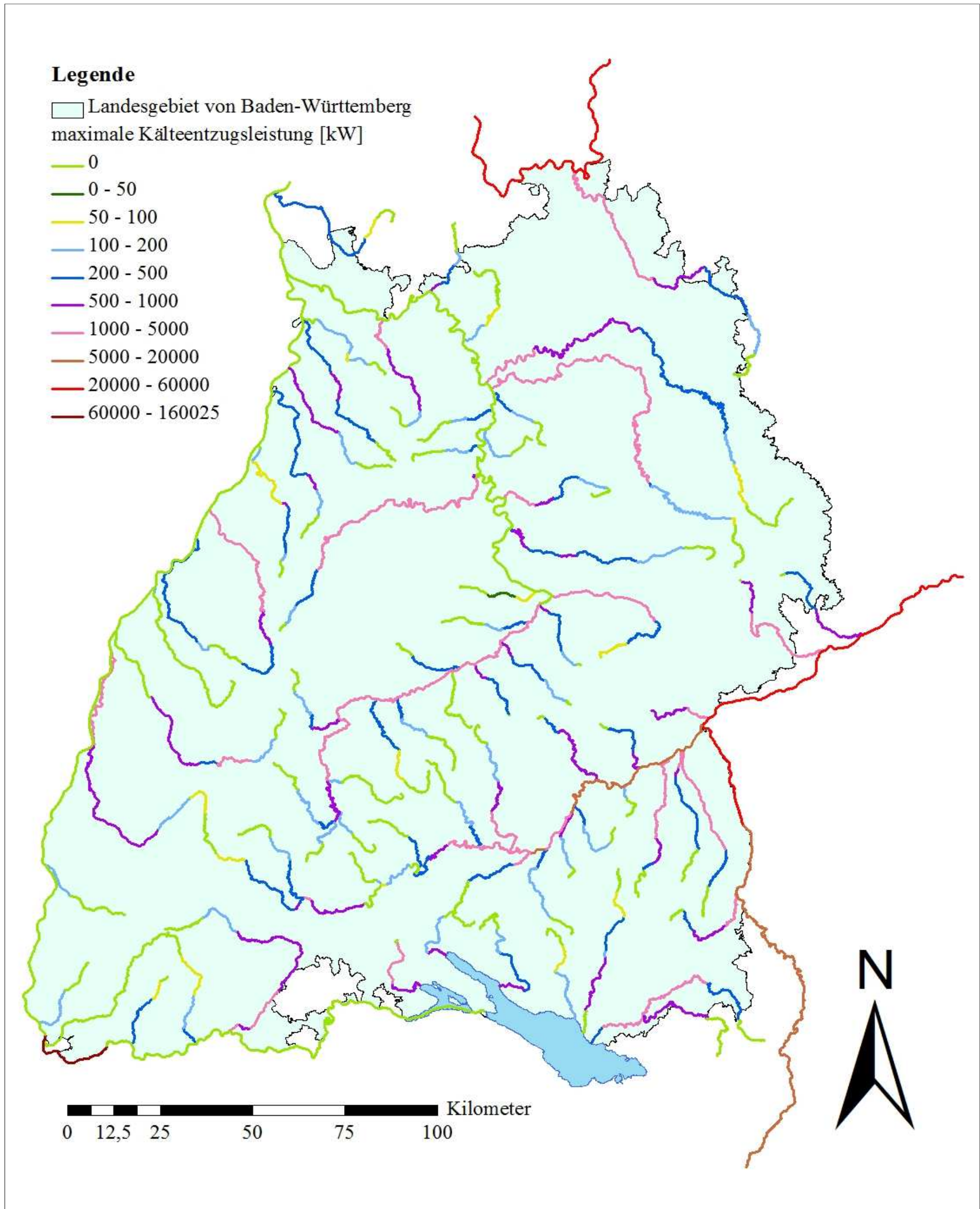


Abbildung B2: Thermische Potentialkarte für Baden-Württemberg für das Szenario maximale Wassertemperatur (T_{Max}) bei einer Entnahmerate von 5 % des MNQ

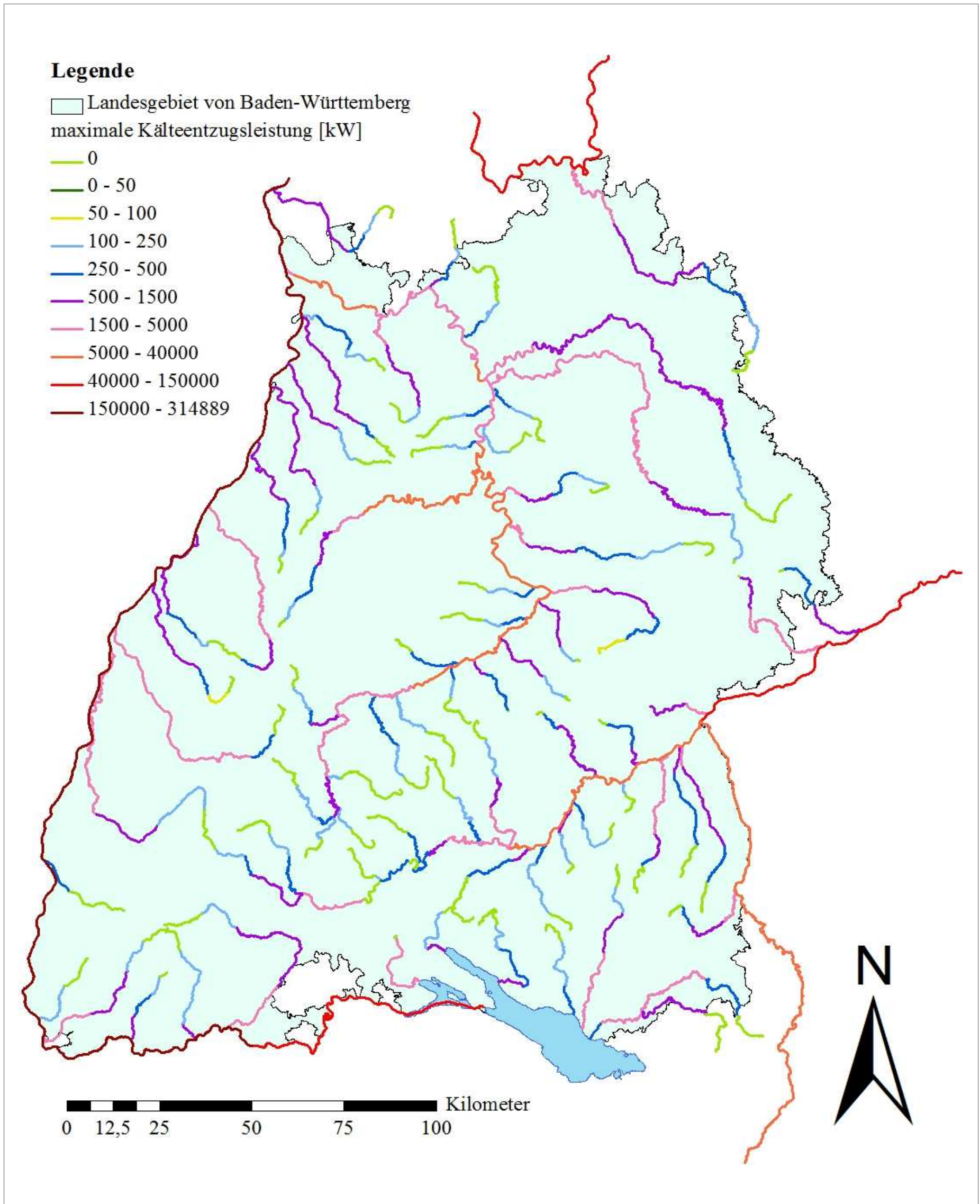


Abbildung B3: Thermische Potentialkarte für Baden-Württemberg für das Szenario mittlere jährliche Maximaltemperatur ($T_{\text{mittel jährl. Max}}$) bei einer Entnahmerate von 5 % des MNQ

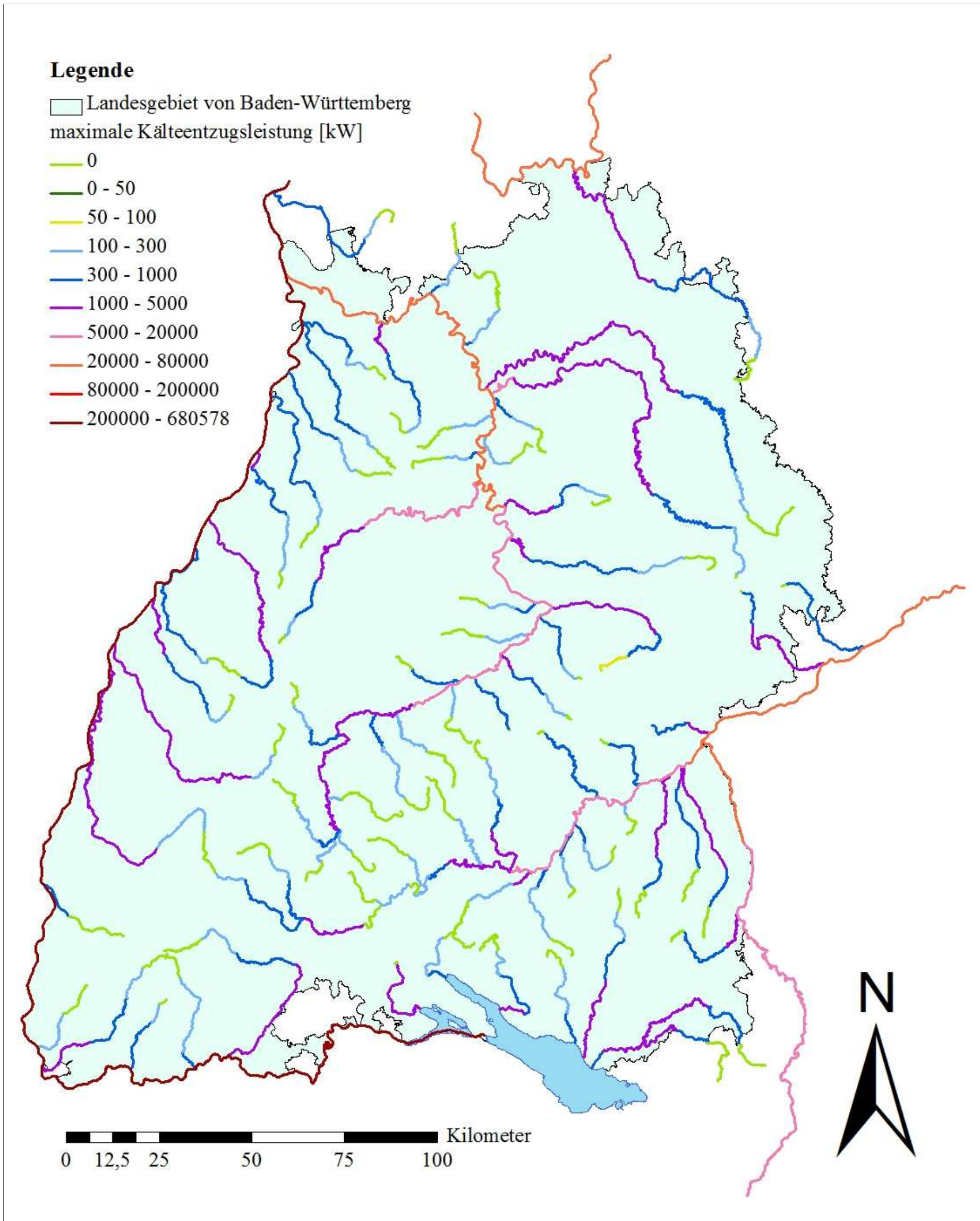


Abbildung B4: Thermische Potentialkarte für Baden-Württemberg für das Szenario mittlere Sommertemperatur ($T_{\text{mittel Sommer}}$) bei einer Entnahmerate von 5 % des MNQ

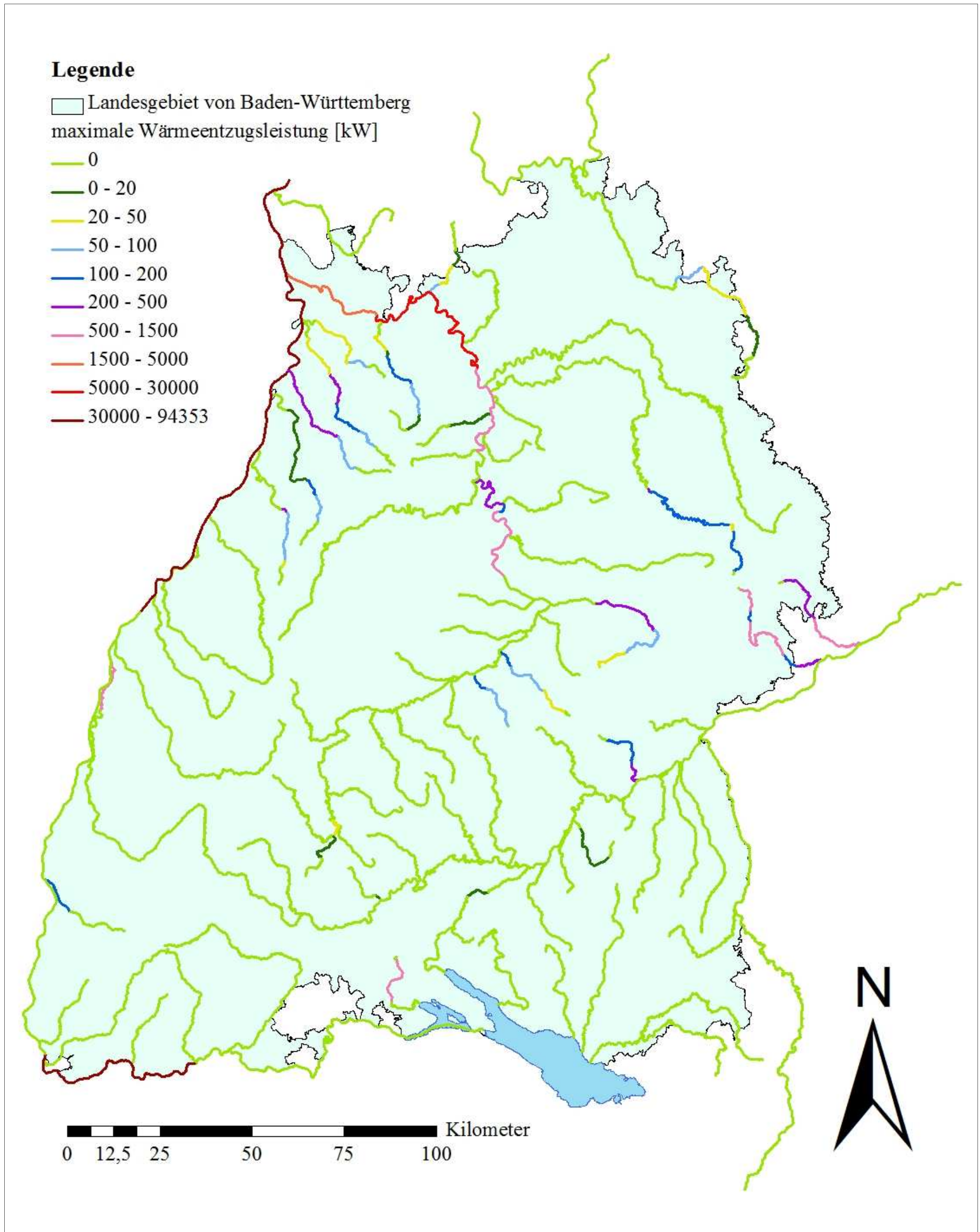


Abbildung B5: Thermische Potentialkarte für Baden-Württemberg für das Szenario minimale Wassertemperatur (T_{Min}) bei einer Entnahmerate von 5 % des MNQ

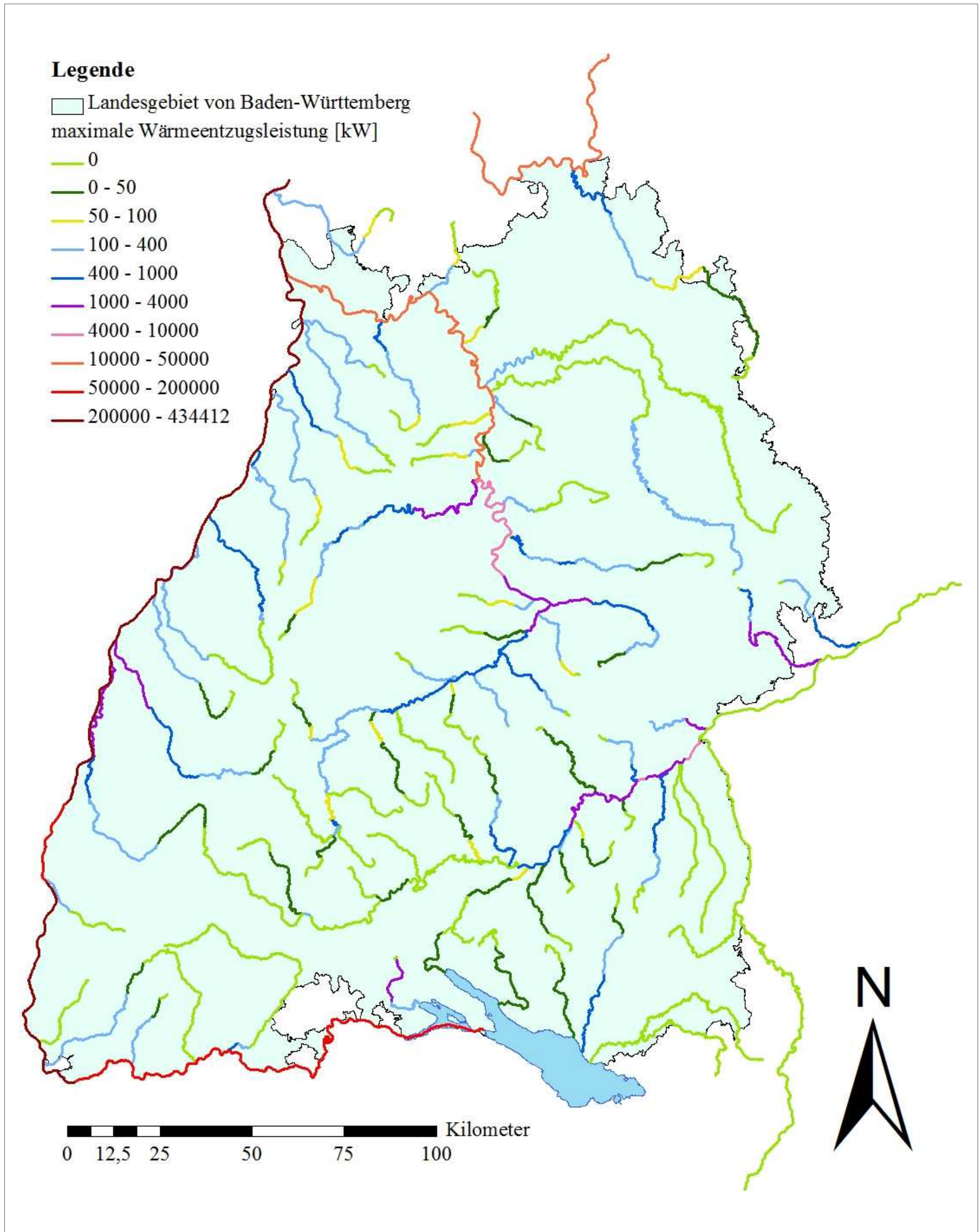


Abbildung B6: Thermische Potentialkarte für Baden-Württemberg für das Szenario mittlere jährliche Minimaltemperatur ($T_{\text{mittel jährl. Min}}$) bei einer Entnahmerate von 5 % des MNQ

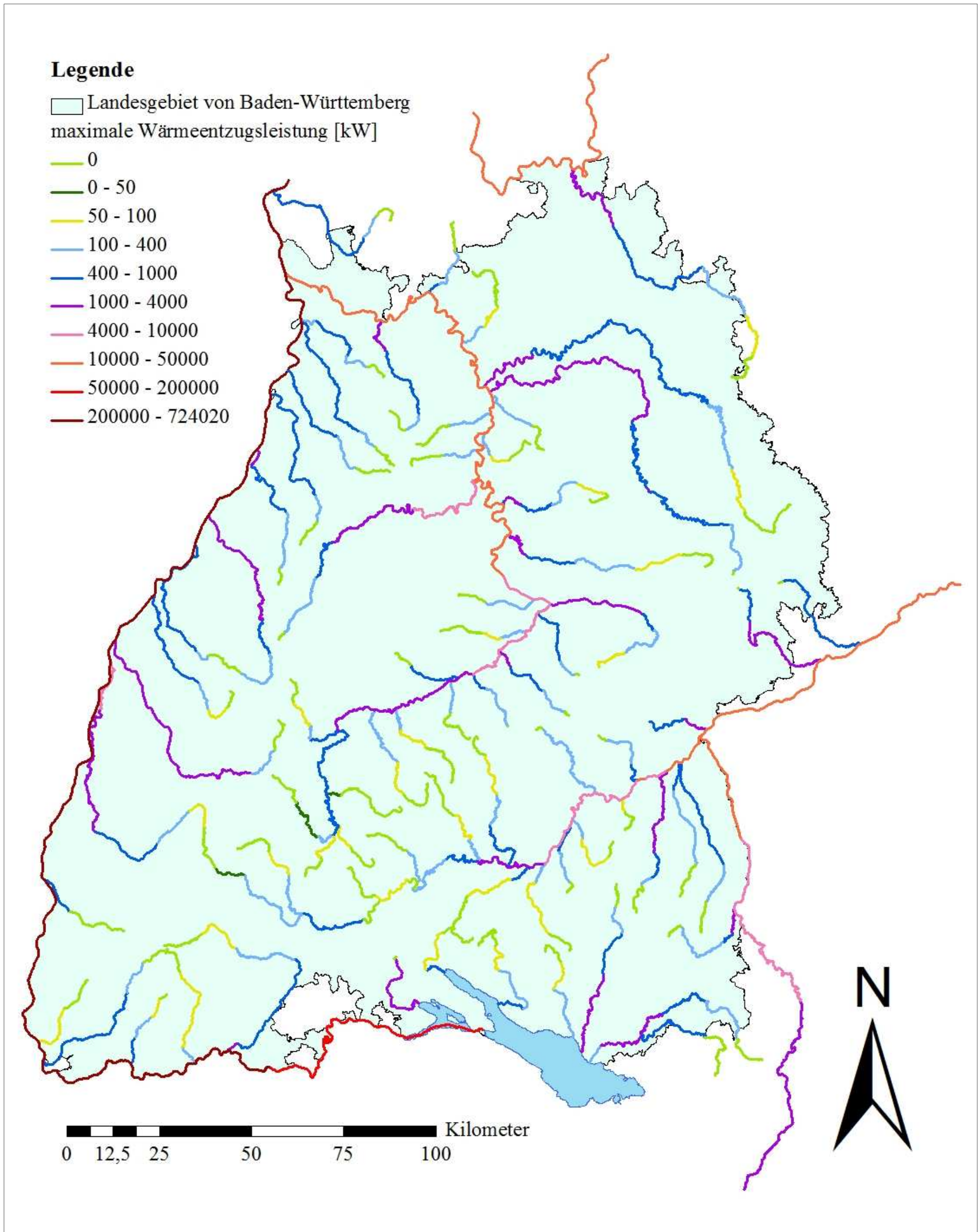


Abbildung B7: Thermische Potentialkarte für Baden-Württemberg für das Szenario mittlere Wintertemperatur ($T_{\text{mittel Winter}}$) bei einer Entnahmerate von 5 % des MNQ