Bachelor-Thesis an der Hochschule Luzern - Technik & Architektur

Titel	**Thermische Energiespeicher und Tourismus – ein interdisziplinäres Projekt zur nachhaltigen Nutzung von Eisflächen**
Diplomandin/Diplomand	**Püntener, Patrizia**
Bachelor-Studiengang	**Bachelor Maschinentechnik**
Semester	**FS19**
Dozentin/Dozent	**Berger, Matthias**
Expertin/Experte	**Lieball, Kai**

Abstract Deutsch

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der thermischen Nutzung von Seen als offenen Latent-Wärmespeicher. Dies erfolgt durch eine Machbarkeitsstudie anhand des Bergsees Obersee in Arosa, Kanton Graubünden. Da in der Schweiz Energie verhältnismässig günstig ist, ist es für Betreiber von Energie-Infrastrukturen wie Kraftwerke oder Leitungen schwierig, ihre Anlagen zu amortisieren. Aus diesem Kontext soll ein neuer Weg gegangen und ein Mehrfachnutzen generiert werden. Wird der Obersee im Winter als Eisspeicher genutzt, kann man daraus einerseits Heizwärme gewinnen und andererseits kann die Eisfläche im Winter touristisch genutzt werden. Mangels stabiler Eisdecke kommt es immer wieder vor, dass der Obersee nicht zur Begehung freigegeben werden kann. Die Klimaerwärmung weist auch in Zukunft nicht auf Besserung.

Zu Beginn der Arbeit wird das offene, natürliche System «Obersee» abgegrenzt und die saisonalen Energieflüsse au Grundlage der meteorologischen CH2018-Modelldaten betrachtet. Diese natürlichen Energieflüsse werden mit Matlab simuliert, woraus unter anderem Eis- und Schneeverlauf ersichtlich sind. Auf Grundlage dessen soll das Wärmepotenzial des Obersees heute und in Zukunft abgeschätzt werden. Es werden mehrere Möglichkeiten zur technischen Umsetzung diskutiert. Der Fokus liegt dabei auf geschlossenen Primärkreisläufen, bei welchen die Wärmeübertragung im See über einen Solekreislauf stattfindet. Schlussendlich wird auf den Nutzen und Aufwand des Projekts aus Sicht von allen betroffenen Parteien hingewiesen und eine Empfehlung zur Realisierung abgegeben.

Der Obersee hat ein Wärmepotenzial von ungefähr 3 MW und ist für eine Niedertemperatur-Anwendung geeignet. Mit der thermischen Nutzung kann auch in Zukunft, sicherlich bis Ende des Jahrhunderts, eine begehfähige Eisschicht sichergestellt werden. Eine technische Umsetzung mittels geschlossenem Primärkreislauf ist jedoch unrealistisch. Das Verhältnis von Aufwand zu Nutzen steht in keinem Verhältnis, da sich bereits die Materialkosten für den Primärkreislauf auf mehrere Millionen Franken belaufen. Die nötige Wärmeübertragungsfläche und der Druckverlust der Soleströmung werden sehr hoch. Denkbar ist eine Umsetzung mittels offenem Primärkreislauf, ähnlich der bereits bekannten, thermischen Nutzung von Seen im sensiblen Bereich. Dabei würde das Seewasser direkt zur Wärmepumpe gepumpt und die Wärme dort auf den Verdampfer übertragen. Durch den Wassereinlauf in der obersten Schicht des Sees entsteht eine erzwungene Konvektion, deren Einfluss auf die Eisbildung unklar ist. Dies muss in einem nächsten Schritt abgeklärt werden.

Alle Rechte vorbehalten. Die Arbeit oder Teile davon dürfen ohne schriftliche Genehmigung der Rechteinhaber weder in irgendeiner Form reproduziert noch elektronisch gespeichert, verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Sofern die Arbeit auf der Website der Hochschule Luzern online veröffentlicht wird, können abweichende Nutzungsbedingungen unter Creative-Commons-Lizenzen gelten. Massgebend ist in diesem Fall die auf der Website angezeigte Creative-Commons-Lizenz.

Abstract Englisch
The bachelor thesis deals with the thermal use of lakes as open latent heat storages. This is done by means of a feasibility study on the mountain lake Obersee in Arosa, canton Graubünden (Switzerland). Since energy is relatively cheap in Switzerland, it is difficult for operators of energy infrastructures such as power plants or pipelines to amortize their facilities. From this context, a new path should be taken and multiple benefits generated. If the Obersee is used as an ice storage in winter, it can be used to generate heat on the one hand and the ice surface can be used for tourism in winter on the other. Due to the lack of a stable ice cover, it happens again and again that the Obersee cannot be opened for walking. Global warming will not improve in the future either.
At the beginning of the work, the open, natural system "Obersee" is delimited and the seasonal energy flows are considered on the basis of the meteorological CH2018 model data. These natural energy flows are simulated with Matlab, which shows, among other things, the course of ice and snow. On the basis of this, the heat potential of the Obersee is to be estimated today and in the future. Several possibilities for technical implementation will be discussed. The focus here is on closed primary cycles in which the heat transfer in the lake takes place via a brine cycle. Finally, the benefits and costs of the project from the point of view of all parties concerned will be pointed out and a recommendation for implementation will be made.
Obersee has a heat potential of approximately 3 MW and is suitable for low-temperature applications. Thermal utilisation will also ensure a walk-in ice layer in the future, certainly by the end of the century. However, a technical implementation by means of a closed primary circuit is unrealistic. The cost-benefit ratio is disproportionate, as the material costs for the primary circuit already amount to several million francs. The required heat transfer area and the pressure loss of the brine flow become very high. An implementation by means of an open primary cycle is conceivable, similar to the already known thermal use of lakes in sensitive areas. The lake water would be pumped directly to the heat pump and the heat would be transferred to the evaporator. The water inlet in the uppermost layer of the lake causes forced convection, the influence of which on ice formation is unclear. This must be clarified in a next step.

Ort, Datum Horw, 04.06.2019
© Patrizia Püntener, Hochschule Luzern – Technik & Architektur

Bachelor-Thesis 2019

Thermische Energiespeicher und Tourismus – ein interdisziplinäres Projekt zur nachhaltigen Nutzung von Eisflächen

Verfasserin:	Patrizia Püntener
Betreuer:	Dr. Matthias Berger
Abgabedatum:	07. Juni 2019

Abstract

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der thermischen Nutzung von Seen als offenen Latent-Wärmespeicher. Dies erfolgt durch eine Machbarkeitsstudie anhand des Bergsees Obersee in Arosa, Kanton Graubünden. Da in der Schweiz Energie verhältnismässig günstig ist, ist es für Betreiber von Energie-Infrastrukturen wie Kraftwerke oder Leitungen schwierig, ihre Anlagen zu amortisieren. Aus diesem Kontext soll ein neuer Weg gegangen und ein Mehrfachnutzen generiert werden. Wird der Obersee im Winter als Eisspeicher genutzt, kann man daraus einerseits Heizwärme gewinnen und andererseits kann die Eisfläche im Winter touristisch genutzt werden. Mangels stabiler Eisdecke kommt es immer wieder vor, dass der Obersee nicht zur Begehung freigegeben werden kann. Die Klimaerwärmung weist auch in Zukunft nicht auf Besserung.

Zu Beginn der Arbeit wird das offene, natürliche System «Obersee» abgegrenzt und die saisonalen Energieflüsse au Grundlage der meteorologischen CH2018-Modelldaten betrachtet. Diese natürlichen Energieflüsse werden mit Matlab simuliert, woraus unter anderem Eis- und Schneeverlauf ersichtlich sind. Auf Grundlage dessen soll das Wärmepotenzial des Obersees heute und in Zukunft abgeschätzt werden. Es werden mehrere Möglichkeiten zur technischen Umsetzung diskutiert. Der Fokus liegt dabei auf geschlossenen Primärkreisläufen, bei welchen die Wärmeübertragung im See über einen Solekreislauf stattfindet. Schlussendlich wird auf den Nutzen und Aufwand des Projekts aus Sicht von allen betroffenen Parteien hingewiesen und eine Empfehlung zur Realisierung abgegeben.

Der Obersee hat ein Wärmepotenzial von ungefähr 3 MW und ist für eine Niedertemperatur-Anwendung geeignet. Mit der thermischen Nutzung kann auch in Zukunft, sicherlich bis Ende des Jahrhunderts, eine begehfähige Eisschicht sichergestellt werden. Eine technische Umsetzung mittels geschlossenem Primärkreislauf ist jedoch unrealistisch. Das Verhältnis von Aufwand zu Nutzen steht in keinem Verhältnis, da sich bereits die Materialkosten für den Primärkreislauf auf mehrere Millionen Franken belaufen. Die nötige Wärmeübertragungsfläche und der Druckverlust der Soleströmung werden sehr hoch. Denkbar ist eine Umsetzung mittels offenem Primärkreislauf, ähnlich der bereits bekannten, thermischen Nutzung von Seen im sensiblen Bereich. Dabei würde das Seewasser direkt zur Wärmepumpe gepumpt und die Wärme dort auf den Verdampfer übertragen. Durch den Wassereinlauf in der obersten Schicht des Sees entsteht eine erzwungene Konvektion, deren Einfluss auf die Eisbildung unklar ist. Dies muss in einem nächsten Schritt abgeklärt werden.

The bachelor thesis deals with the thermal use of lakes as open latent heat storages. This is done by means of a feasibility study on the mountain lake Obersee in Arosa, canton Graubünden (Switzerland). Since energy is relatively cheap in Switzerland, it is difficult for operators of energy infrastructures such as power plants or pipelines to amortize their facilities. From this context, a new path should be taken and multiple benefits generated. If the Obersee is used as an ice storage in winter, it can be used to generate heat on the one hand and the ice surface can be used for tourism in winter on the other. Due to the lack of a stable ice cover, it happens again and again that the Obersee cannot be opened for walking. Global warming will not improve in the future either.

At the beginning of the work, the open, natural system "Obersee" is delimited and the seasonal energy flows are considered on the basis of the meteorological CH2018 model data. These natural energy flows are simulated with Matlab, which shows, among other

things, the course of ice and snow. On the basis of this, the heat potential of the Obersee is to be estimated today and in the future. Several possibilities for technical implementation will be discussed. The focus here is on closed primary cycles in which the heat transfer in the lake takes place via a brine cycle. Finally, the benefits and costs of the project from the point of view of all parties concerned will be pointed out and a recommendation for implementation will be made.

Obersee has a heat potential of approximately 3 MW and is suitable for low-temperature applications. Thermal utilisation will also ensure a walk-in ice layer in the future, certainly by the end of the century. However, a technical implementation by means of a closed primary circuit is unrealistic. The cost-benefit ratio is disproportionate, as the material costs for the primary circuit already amount to several million francs. The required heat transfer area and the pressure loss of the brine flow become very high. An implementation by means of an open primary cycle is conceivable, similar to the already known thermal use of lakes in sensitive areas. The lake water would be pumped directly to the heat pump and the heat would be transferred to the evaporator. The water inlet in the uppermost layer of the lake causes forced convection, the influence of which on ice formation is unclear. This must be clarified in a next step.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung 1
1.1 Ausgangslage 1
1.2 Ziele 1
1.3 Vorgehen 1
1.4 Lesehinweis 2
2. Natürliche Gegebenheiten 3
2.1 Geografie 3
2.2 Ökologie 4
2.2.1 Flora 4
2.2.2 Fauna 4
2.3 Meteorologie 5
3. Energiehaushalt von Gewässern 7
3.1 Systemgrenzen 7
3.2 Energiehaushalt 7
3.2.1 Beispiel Zürichsee 9
3.3 Vereinfachung des Systems 10
3.4 Energieströme 10
3.4.1 Strahlung 12
3.4.2 Verdunstung 14
3.4.3 Konvektion 15
3.4.4 Niederschlag 15
4. Nutzungsrelevante Prozesse 17
4.1 Wassertemperatur im Jahresverlauf 17
4.2 Eisbildung 19
4.3 Simulation 21
4.3.1 Randbedingungen Simulation «Ohne Niederschlag» 21
4.3.2 Randbedingungen Simulation «Mit Niederschlag» 22
4.3.3 Simulations-Ergebnisse 23
4.3.4 Erkenntnisse aus der Simulation 26
4.4 Nährstoffe 27
4.5 Klimatischer Trend 28
5. Rechtliche Grundlagen 30
6. Thermische Nutzung 32
6.1 Wärmepotenzial 33
6.1.1 Simulation des Wärmepotenzials 34
6.2 Gesamtkonzept 40

6.3 Primärkreislauf 43
6.3.1 Geschlossener Kreislauf 43
6.3.2 Offener Kreislauf 62
6.3.3 Vergleich offener/ geschlossener Kreislauf....63
6.4 Pumpen....64
6.5 Komplettlösungen und Wärmepumpen....65
7. Umwelt 67
7.1 Einfluss auf Flora & Fauna 67
7.2 Einfluss auf Gemeinde, Bevölkerung und Tourismus 68
7.2.1 Ganzjährig....68
7.2.2 Sommermonate....69
7.2.3 Wintermonate....69
8. Kosten....71
8.1 Kosten Primärkreislauf 71
8.2 Ersparnis von nicht erneuerbarer Energie 72
8.3 Kostenersparnis 73
9. Erkenntnisse 74
9.1 Technische Umsetzung....74
9.1.1 Wärmeleistung 74
9.1.2 Nutzungsperiode....74
9.1.3 Gesamtkonzept....75
9.1.4 Primärkreislauf 76
9.2 Potentielle Wärmekunden 77
9.3 Aufwand & Nutzen....78
9.3.1 Nutzen....78
9.3.2 Aufwand....79
10. Zusammenfassung und Ausblick 81
10.1 Zusammenfassung....81
10.2 Ausblick....81
11. Literatur 83
12. Anhang....85

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Arosa im Kanton Graubünden (Quelle: map.geo.admin.ch) 3
Abbildung 2: Obersee in Arosa (Quelle: map.geo.admin.ch) 3
Abbildung 3: Standort der Wetterstation (Quelle: map.geo.admin.ch)..... 5
Abbildung 4: Systemgrenze Obersee 7
Abbildung 5: Energieströme über die Systemgrenze 8
Abbildung 6: Latente und sensible Wärme 8
Abbildung 7: Wärmebilanz Zürichsee [Brennwald, 2012]..... 9
Abbildung 8: Vereinfachtes System mit den Energieströmen.....10
Abbildung 9: Voraussichtliche Energiebilanz im Jahr 2030.....11
Abbildung 10: Detaillierte, voraussichtliche Wärmeströme im Liniendiagramm für das Jahr 2030.....11
Abbildung 11: Strahlungs-Anteile am Jahres-Beispiel 2030/2031.....14
Abbildung 12: Durchschnittlicher, oberflächennaher Wasser- und Lufttemperaturverlauf im Jahr 2018.....17
Abbildung 13: Temperatur- und Dichteverlauf in einem See im Winter und Sommer [Brennwald, 2012].....18
Abbildung 14: Vertikaler Temperaturverlauf des Vierwaldstättersees im Laufe der Jahreszeiten [Brennwald, 2012].....19
Abbildung 15: Fortlaufende Eisbildung im November/ Dezember 2018.....20
Abbildung 16: Eisaufbau am 18.12.2018 gemäss Gemeinde Arosa.....20
Abbildung 17: Sauerstoff- und Nährstoffkonzentration im See in Abhängigkeit der Tiefe [AWEL, 2019].....28
Abbildung 18: Änderung der durchschnittlichen, winterlichen Lufttemperatur gegenüber der Referenzperiode von 1981-2010 ohne Klimaschutz. (Quelle: Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz).....28
Abbildung 19: Änderung der durchschnittlichen, winterlichen Lufttemperatur gegenüber der Referenzperiode von 1981-2010 mit Klimaschutz. (Quelle: Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz).....29
Abbildung 20: Winterliche Durchschnittstemperaturen für den Ort Arosa aus dem CH2018-Modell.....29
Abbildung 21: Übersicht der verschiedenen Teilsysteme.....32
Abbildung 22: Zentrale Temperaturerhöhung.....41
Abbildung 23: Dezentrale Temperaturerhöhung.....42
Abbildung 24: Zweistufige Temperaturerhöhung.....43
Abbildung 25: Axialansicht eines Rohres mit Eisschicht.....45
Abbildung 26: Colebrook-Diagramm für den Widerstandsbeiwert λ [Böswirth und Bschorer, 2014].....52
Abbildung 27: Korrekturfaktor Krümmungswinkel des Rohres (Quelle: Schweizer FN).....53
Abbildung 28: Verhalten des Wärmedurchgangkoeffizienten bei verschiedenen Eisdicken..58
Abbildung 29: Wärmedurchgangskoeffizient verschiedener Wärmeübertrager [Philippen et al. (2012b)].....59
Abbildung 30: Wärmeübertragung mittels Platten.....62
Abbildung 31: Offener Primärkreislauf.....62
Abbildung 32: Q-/H-Diagramm zur Typologie von Pumpen [topmotors.ch, 2019].....65
Abbildung 33: Einsatzgrenzen der Vitocal 300-G (links) und Vitocal 350-G (rechts) nach EN 14511. Temperaturspreizung primärseitig 3 K, sekundärseitig 5 K. [BFE, 2014].....66
Abbildung 34: Eisspeicher-Komplettsystem mit Solarabsorbern der Firma Viessmann. [BFE, 2014].....66

Abbildung 35: Heiztage in Arosa von 01. August 2018 bis 31. Juli 2019 mit einer Heizgrenze von 12 °C 75
Abbildung 36: Vorschlag zur Umsetzung bzw. nächsten Vorstudie.....77

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Die 3 Treibhausgas-Szenarien [NCCS, 2019] 6
Tabelle 2: Albedo-Werte [Maniak, 2013].....12
Tabelle 3: Simulations-Ergebnisse für den natürlichen Jahresverlauf von Wasser-, Lufttemperatur sowie Eis- und Schneedicke verschiedener Jahre 25
Tabelle 4: Einfluss der Rohrlänge auf die Nusselt-Zahl bei turbulenter Strömung.....47
Tabelle 5: Einfluss der Rohrlänge auf die Nusselt-Zahl bei laminarer Strömung.....49
Tabelle 6: Widerstandsbeiwert des 90°-Krümmers [Böswirth und Bschorer, 2014].....53
Tabelle 7: Verschiedene Möglichkeiten, die Wärmeübertragung mittels Rohren umzusetzen 55
Tabelle 8: Ergebnisse der Parameter für den Wärmedurchgang 57
Tabelle 9: Ergebnisse der Parameter zur Auswertung der hydraulischen Bilanz 61
Tabelle 10: Vorteile von geschlossenen, bzw. offenen Primärkreisläufen.....64
Tabelle 11: Nachteile von geschlossenen, bzw. offenen Primärkreisläufen 64
Tabelle 12: Materialkosten der Rohre und Anforderungen an die Pumpe.....72

Nomenklatur

a_r	[-]	Albedo (Reflexionsvermögen)
A_{See}	m^2	Seeoberfläche
A_i	m^2	Rohr-Innenfläche
b	[-]	Relativer Bewölkungsgrad
c_p	$\mathrm{J}/(K*kg)$	Spezifische, isobare Wärmekapazität
$c_{p,W}$	$\mathrm{J}/(K*kg)$	Isobare Wärmekapazität von Wasser
d	[-]	Modalwert der Windfunktion
d	m	(Hydraulischer) Durchmesser
d_i	m	Rohr-Innendurchmesser
E_a	J	Aufgenommene, elektrische Energie
e_{aL_Eis}	hPa	Wasserdampfdruck der Luft (Partialdruck) über Eis
e_{aL}	hPa	Wasserdampfdruck der Luft (Partialdruck) über Wasser
e_{sL_Eis}	hPa	Sättigungsdampfdruck von Luft über Eis
e_{sL}	hPa	Sättigungsdampfdruck von Luft über Wasser
e_{sW}	hPa	Sättigungsdampfdruck von Wasser
$e_{s_Eis_Schnee}$	hPa	Sättigungsdampfdruck der schmelzenden Schneeoberfläche
e_v	m^2/s^2	Druckverluste gesamt
$f_3(\mathrm{Pr})$	[-]	Prandtl-Funktion
g	m/s^2	Erdbeschleunigung
$\dot{H}_{zu}$	W/m^2	Zufliessender Enthalpiestrom
$\dot{H}_{ab}$	W/m^2	Abfliessender Enthalpiestrom
$\dot{H}_{pr}$	W/m^2	Enthalpiestrom durch Niederschlag
$h_{s,W}$	J/kg	Schmelzenthalpie von Wasser
H_F	m	Förderhöhe der Pumpe
JAZ	[-]	Jahresarbeitszahl
k	$W/(K*m^2)$	Wärmedurchgangskoeffizient
k_{Eis}	$W/(K*m^2)$	Wärmedurchgangskoeffizient durch Eis
k_{Wasser}	$W/(K*m^2)$	Wärmedurchgangskoeffizient bei Wasser
L	m	Charakteristische Länge / Anströmlänge (je nach beschriebener Definition)
$\dot{m}$	kg/s	Massenstrom
n	[-]	Anzahl der Rohre
Nu	[-]	Nusselt-Zahl
Nu_l	[-]	Laminare Nusselt-Zahl
Nu_T	[-]	Turbulente Nusselt-Zahl
p_1, p_2	N/m^2	Druckniveau 1 & 2
P_h	W	Hydraulische Leistung
Pr	[-]	Prandtl-Zahl
pr	mm	Niederschlagsmenge
Q_{sens}	J	Sensible Wärme
Q_{lat}	J	Latente Wärme
$\dot{Q}_{SB}$	W/m^2	Summe aller Strahlungsterme
$\dot{Q}_K$	W/m^2	Konvektions-Wärmestrom
$\dot{Q}_V$	W/m^2	Verdunstungs-Wärmestrom
$\dot{Q}_{GB}$	W/m^2	Wärmestrom durch Gewässerbett
$\dot{Q}_{prim}$	W	Wärmestrom des Primärkreislaufes

$\dot{Q}_{techn}$	W	Technischer Wärmestrom (Übergang auf Primärkreislauf)
$\dot{Q}_{nötig}$	W	Notwendiger Wärmestrom für ein bestimmtes Ziel
$\dot{Q}_{nat}$	W	Natürlicher Wärmestrom aus der Gesamtbilanz des Sees
Q_{Nutz}	J	Abgegebene Wärme
$\dot{R}_A$	W/m^2	Langwellige Ausstrahlung des Sees
$\dot{R}_G$	W/m^2	Langwellige, absorbierte Gegenstrahlung
$\dot{R}_S$	W/m^2	Kurzwellige Globalstrahlung
$\dot{R}_H$	W/m^2	Ungerichtete, kurzwellige (diffuse) Himmelsstrahlung
$\dot{R}_I$	W/m^2	Direkte, kurzwellige Himmelsstrahlung auf die Horizontalebene
$\dot{R}_{G0}$	W/m^2	Langwellige, absorbierte Gegenstrahlung bei wolkenlosem Himmel
r_i	m	Rohr-Innenradius
r_a	m	Rohr-Aussenradius
r_E	m	Aussenradius der Eisschicht
Ra	[-]	Raleigh-Zahl
Re	[-]	Reynoldszahl
T_{aus}	K	Austrittstemperatur der Sole
T_{ein}	K	Eintrittstemperatur der Sole
T_{Eis}	K	Eistemperatur
T_s	K	Oberflächentemperatur
T_∞	K	Temperatur des umgebenen Wassers
T_{Sole}	K	Soletemperatur
T_L	K	Lufttemperatur
T_W	K	Wassertemperatur
t	s	Zeit
u	m/s	Windgeschwindigkeit, 2m über Boden gemessen
$\dot{V}$	m^3/s	Volumenstrom
v	m/s	Geschwindigkeit (einer Flüssigkeit)
v_1, v_2	m/s	Geschwindigkeit Niveau 1 & 2
w	[-]	Modalwert der Windfunktion
z_1, z_2	m	Höhe Niveau 1 & 2
z	m	Schichtdicke
z_{Eis}	m	Eisdicke
$z_{Oben,Winter}$	m	Dicke der winterlichen Oberflächenschicht
α_i	$W/(K*m^2)$	Wärmeübergangskoeffizient Innenströmung
α_a	$W/(K*m^2)$	Wärmeübergangskoeffizient Aussenströmung
β	[-]	Temperatur-Beiwert
$\Delta p_{v,lok}$	N/m^2	Lokale Druckverluste
$\Delta p_{v,kont}$	N/m^2	Kontinuierliche Druckverluste
ε	[-]	Emissivität der Oberfläche
ρ_E	kg/m^3	Dichte von Eis
ρ_W	kg/m^3	Dichte von Wasser
ρ_S	kg/m^3	Dichte von Schnee
η	$N*m/s^2$	Dynamische Viskosität
v	m^2/s	Kinematische Viskosität
λ	[-]	Widerstandsbeiwert der ausgebildeten Rohrströmung
λ_R	$W/(K*m)$	Wärmeleitfähigkeitskoeffizient der Rohrwand
λ_E	$W/(K*m)$	Wärmeleitfähigkeitskoeffizient des Eises
σ	[-]	Stefan-Boltzmann-Konstante
φ	%	Relative Luftfeuchtigkeit
ζ	[-]	Beiwert der Nusselt-Formel / Widerstandsbeiwert von Einbauten (je nach beschriebener Definition)

1. Einleitung

1.1 Ausgangslage

In der Schweiz ist Energie verhältnismässig günstig. Energieinfrastrukturen wie Kraftwerke oder Leitungen wirtschaftlich zu amortisieren, wird für die Betreiber immer schwieriger. Gefragt ist ein Mehrfachnutzen. Nur dann machen Investitionen Sinn. Aus diesem Kontext geht diese Arbeit hervor. Ist es möglich, einen See als offenen Latentwärmespeicher (sprich Eisspeicher) zu betreiben? Welche (umwelt-)technischen Rahmenbedingungen bringt diese thermische Nutzung mit sich? Dies wird für den Obersee in Arosa abgeklärt. Der Obersee wird im Winter touristisch genutzt. Einerseits wird auf dessen Eisflächen spaziert und Schlittschuh gelaufen, andererseits fanden darauf mehr als 100 Jahren Pferderennen statt. Mangels stabiler Eisdecke gab es in all den Jahren immer wieder Rennabsagen. Dies war in den 2000er Jahren vermehrt der Fall, sodass das Organisationskomitee Anfangs 2019 entschieden hat, zukünftig keine Pferderennen mehr durchzuführen, da die Planungssicherheit fehlt. Schuld daran ist nicht zuletzt die Klimaerwärmung, welche auch in den Alpentälern immer höhere Temperaturen mit sich bringt und Schnee- und Eisaufbau mindert. Mit einer thermischen Energiegewinnung aus dem Obersee wäre es zum einen möglich, die touristische Nutzung der Eisfläche unabhängig von Wetter und Klima zu garantieren und andererseits wäre dies eine nachhaltige Wärmequelle zum Heizen von umliegenden Gebäuden oder Infrastrukturen. Dies würde eine hohe Wertschöpfung erzielen.

1.2 Ziele

Ziel dieser Arbeit ist es, die technischen Rahmenbedingungen zur möglichen, thermischen Nutzung des Obersees in Arosa zu erarbeiten. Dabei ergeben sich folgende Teilfragen:

a) Wieviel Wärme lässt sich saisonal aus dem „Eisspeicher“ Obersee unter nachhaltigen Gesichtspunkten und Berücksichtigung des Umweltschutzes gewinnen?

b) Wie kann eine technische Umsetzung auf der Wärmeerzeugerseite aussehen (inkl. hydraulischer/ energetischer Bilanz, Investitionskosten und Betriebskosten)?

c) Wie verhalten sich Investitionskosten zu möglichen Kostenersparnis aus der Heizwärme auf Verbraucherseite? Welche Randbedingungen gibt es aus Sicht des Umweltschutzes?

d) Wie sieht der langfristige Trend aus (Klimawandel), wenn man garantieren will, dass der Obersee über einen definierten Zeitraum zugefroren sein soll?

1.3 Vorgehen

Am Anfang steht die Einarbeitung in das Thema. Gibt es ähnliche Projekte und von welchen Erfahrungen aus Projekten, bei welchen es um die thermische Energienutzung von Seen geht, kann profitiert werden? Es werden geografische und meteorologische Daten gesammelt und das System wird abgegrenzt. Annahmen und Vereinfachungen werden getroffen. Daraus lässt sich der mögliche, saisonale «Wärmegewinn» berechnen.

In einem weiteren Schritt geht es um die technische Umsetzung. Welche technischen Einrichtungen sind nötig? Der Primärkreislauf, der die Wärme vom See zu einer Wärmepumpe transportiert kann auf zwei Arten ausgeführt werden. Einerseits geschlossen oder offen. Die geschlossene Art wird dabei detailliert besprochen. Die Möglichkeiten für den Sekundärkreislauf, quasi das Fernwärmenetz, das den Wärmetransport zu den Wärmeverbrauchern sicherstellt, und die Wärmepumpen, die das Temperaturniveau (auf die Vorlauftemperatur) erhöhen, werden im Groben aufgezeigt.

Im nächsten Schritt sollen die Investitions- und Betriebskosten abgeschätzt werden. Mögliche Verbraucher sollen ausgemacht werden. Die entstehenden Kosten werden mit der möglichen Ersparnis von alternativen Energiequellen, wie Ölheizungen, verglichen.

Zuletzt wird überprüft, welche Auswirkungen diese thermische Energienutzung auf die Umwelt hat. Dies sind einerseits Flora und Fauna und andererseits das Stadtbild, die Bevölkerung und der Tourismus von Arosa. Dazu gehört auch, welche Gesetze auf Seite des Umweltschutzes eingehalten werden müssen.

1.4 Lesehinweis

Die Berechnungen werden mit Matlab durchgeführt. Die Programme und weitere Dokumente werden digitalisiert im Anhang abgegeben.

2. Natürliche Gegebenheiten

2.1 Geografie

Arosa ist eine Gemeinde im Kanton Graubünden, die ungefähr 15km südöstlich von Chur, am Ende des Schanfigger Tals, liegt. Das Dorf liegt in einer 3km weiten, auf 1700-1900 m.ü.M. liegenden Mulde und ist auf praktisch allen Seiten von Bergen umgeben.

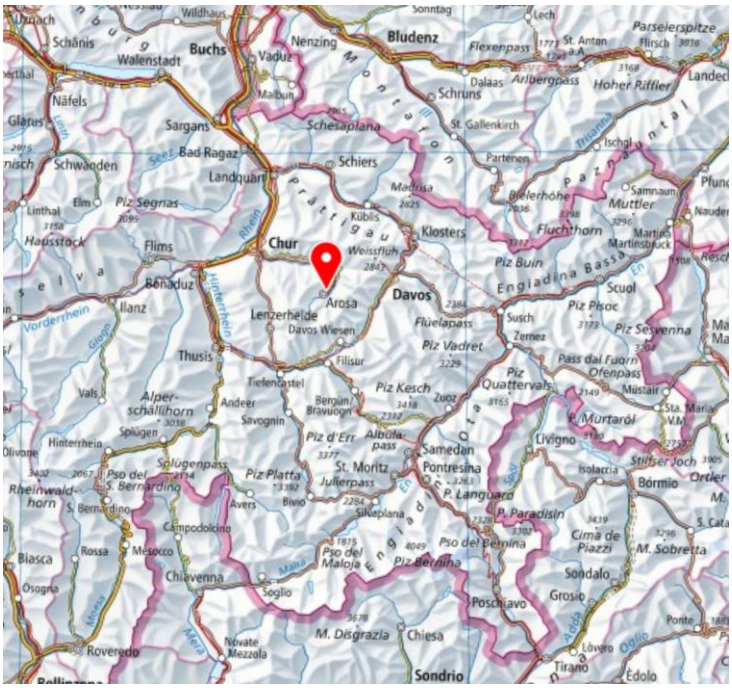


Abbildung 1: Arosa im Kanton Graubünden (Quelle: map.geo.admin.ch)

Im Siedlungsgebiet von Arosa liegen zwei natürliche Bergseen, nämlich der Obersee und der Untersee. Der Obersee liegt, wie die Namen bereits verraten, höher oben und hat die grössere Wasseroberfläche. Verbunden sind die beiden Seen via Mittelbach, der vom Ober- in den Untersee führt.

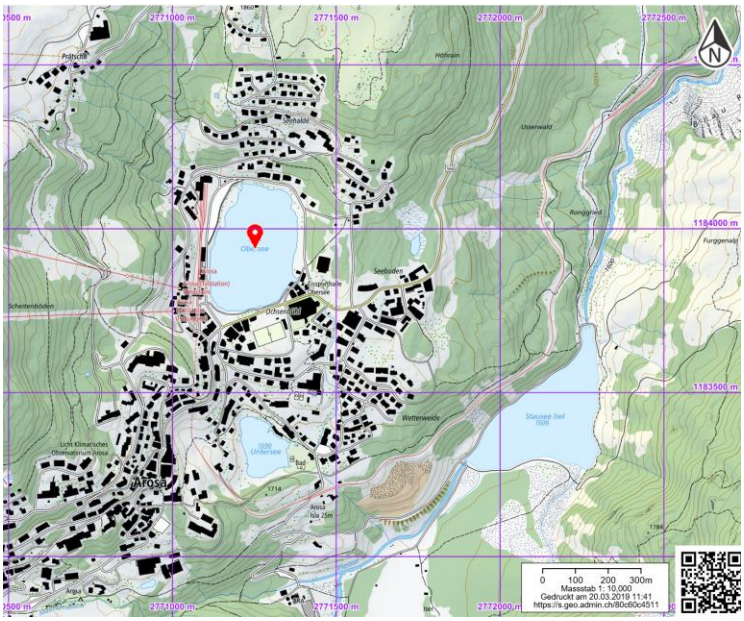


Abbildung 2: Obersee in Arosa (Quelle: map.geo.admin.ch)

Die maximale Tiefe, mittlere Tiefe und das Tiefenprofil sind nicht genau bekannt. Abschätzungen liegen bei einer maximalen Tiefe zwischen 13 m und 30 m. Diese Fakten sind bekannt, bzw. werden für die folgenden Berechnungen berücksichtigt:

- Höhe: 1734 m.ü.M.
- Fläche: 81'900 m^2
- Mittlere Tiefe: 15 m
- Maximale Tiefe: 30 m
- Zufluss: Tomelibach (Volumenstrom unbekannt)
- Abfluss: Mittelbach (Volumenstrom unbekannt)

Der grösste Teil von der Uferzone des Obersees ist überbaut. Der See ist umgeben von Strassen, Gebäuden, einer Uferpromenade, dem Bahnhof und dem Oberseeplatz. Das Gelände in der Umgebung ist im Norden und im Westen steigend. Im Nordosten und im Westen befindet sich ein Wald, sodass der See relativ gut windgeschützt ist und quasi in einer Mulde liegt.

2.2 Ökologie

2.2.1 Flora

Der trockene Uferbereich ist mit Gräsern überwachsen. Einige Tannen stehen in unmittelbarer Nähe des Ufers, weitere (in Wäldern) in einem etwas grösseren Abstand im Nordosten und Westen.

Die Flora im See selbst ist kaum dokumentiert. In der Uferzone befindet sich teilweise Schilf. Aus Berichten von Tauchern ist ersichtlich, dass sich im ufernahen Bereich einige wenige Wasserpflanzen befinden. Weiter hat der See vor allem einen moorigen Untergrund.

2.2.2 Fauna

Der Obersee war in weitem Umkreis seit jeher einer der ergiebigsten Fischgründe. Gegen Ende des 19. Jahrhunderts bis 1928 war er an eine Privatperson verpachtet, der darauf eine Fischzucht betrieb. Es wurden Schleien gefischt. 1938 wurden in grosser Anzahl Amerikanische Bach- und Europäische Seesaiblinge sowie Regenbogenforellen eingesetzt. Weiter ist die Elritze im Obersee heimisch.

Im See leben auch heimische Amphibien wie Teichfrösche, Kröten und Molche.

Viele Wasser- und Riedvögel, wie Tauchenten und europäische Schwimmenten, schalten am Obersee Rast ein. Dies einerseits als Durchzügler, andererseits als Irrgäste. Einziger Standvogel (bleibt d.h. ganzjährig) ist die Stockente.

2.3 Meteorologie

In der Nähe des Obersees gibt es eine Wetterstation, die sich auf einer Höhe von 1820 m.ü.M. befindet. Für die Berechnungen wird das CH2018-Szenario dieser Wetterstation verwendet.

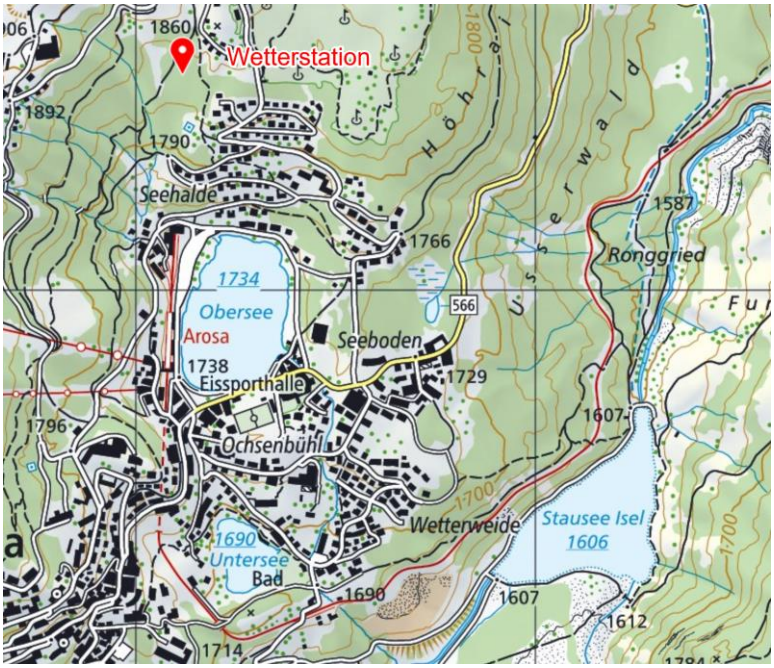


Abbildung 3: Standort der Wetterstation (Quelle: map.geo.admin.ch)

2.3.1 CH2018-Szenario

Die lokalen CH2018 Daten von Arosa sind Teil einer Serie von Datensätzen aus transienten, täglichen Zeitreihen für den Zeitraum von 1981-2099 für mehrere Variablen an einzelnen Schweizer Stationen. Folgende 7 Variablen sind darin enthalten und werden für die nachfolgenden Berechnungen benützt:

- Tägliche, kurzwellige, durchschnittliche Globalstrahlung in [W/m^2]
- Tägliche, oberflächennahe, durchschnittliche Lufttemperatur [°C]
- Tägliche, oberflächennahe, maximale Lufttemperatur [°C]
- Tägliche, oberflächennahe, minimale Lufttemperatur [°C]
- Tägliche, oberflächennahe, durchschnittliche Windgeschwindigkeit [m/s]
- Tägliche, oberflächennahe, durchschnittliche relative Luftfeuchtigkeit [%]
- Tägliche Niederschlagsmenge [mm/d]

Für die nachfolgenden Berechnungen wird die durchschnittliche Lufttemperatur verwendet. Deshalb werden 5 von 7 Variablen in diese Berechnungen einbezogen.

Die CH2018-Szenarien basieren auf den Klimaprognosen von EURO-CORDEX. Diese Klimaprognosen bestehen wiederum aus einer Vielzahl von transienten regionalen Klimaszenarien, die durch verschiedene Kombinationen von globalen und regionalen Klimamodellen und unter der Annahme von drei verschiedenen Treibhausgas-Szenarien durchgeführt werden. Sie dienen dazu, den Einfluss von politischen Entscheidungen und weiteren Faktoren auf die Zukunft des Klimas aufzuzeigen und stellen damit

Handlungsoptionen dar. Die klimatischen Folgen einer Handlung können somit quantifiziert werden.

Szenario	**RCP-Szenario**	**Eigenschaften**
Kein Klimaschutz	RCP8.5	Es werden keine Klimaschutzmassnahmen ergriffen. Die Treibhausgasemissionen nehmen stetig zu. Der Strahlungsantrieb im Jahr 2100 beträgt 8.5 W/m^2 im Vergleich zu 1850.
Begrenzter Klimaschutz	RCP4.5	Der Ausstoss von Treibhausgasemissionen wird zwar eingedämmt, aber der Gehalt in der Atmosphäre steigt noch weitere 50 Jahre. Das Zwei-Grad-Ziel wird verfehlt. Der Strahlungsantrieb im Jahr 2100 beträgt 4.5 W/m^2 im Vergleich zu 1850.
Konsequenter Klimaschutz	RCP2.6	Klimaschutzmassnahmen werden ergriffen. Mit einer umgehend eingeleiteten Senkung der Emissionen wird der Anstieg der Treibhausgase in der Atmosphäre bis in etwa 20 Jahren gestoppt. Damit lassen sich die Ziele des Pariser Klimaabkommens 2016 erreichen. Der Strahlungsantrieb im Jahr 2100 beträgt 2.6 W/m^2 im Vergleich zu 1850.

Tabelle 1: Die 3 Treibhausgas-Szenarien [NCCS, 2019]

RCP steht für «Representative Concentration Pathways». Für die nachfolgenden Berechnungen wird vom Treibhausgas-Szenario RCP4.5 ausgegangen. Dafür werden 25 EURO-CORDEX-Simulationen verwendet.

3. Energiehaushalt von Gewässern

Die Formeln für dieses Kapitel basieren grundlegend auf [Maniak, 2015]. Einige Formel-Beiwerte, die ortsabhängig sind, wurden von [Brennwald, 2012] übernommen, um die Resultate möglichst nahe an die Realität vom Standort Arosa zu bringen.

3.1 Systemgrenzen

Das System «See» beinhaltet der gesamte Wasserinhalt eines Sees. Die Systemgrenze wird direkt an der Grenze zwischen Wasser und Atmosphäre, Gewässerbett, dem Eintritt von Zuflüssen sowie dem Austritt von Abflüssen gezogen. In der folgenden Abbildung ist die Systemgrenze (rot gestrichelt) ersichtlich.

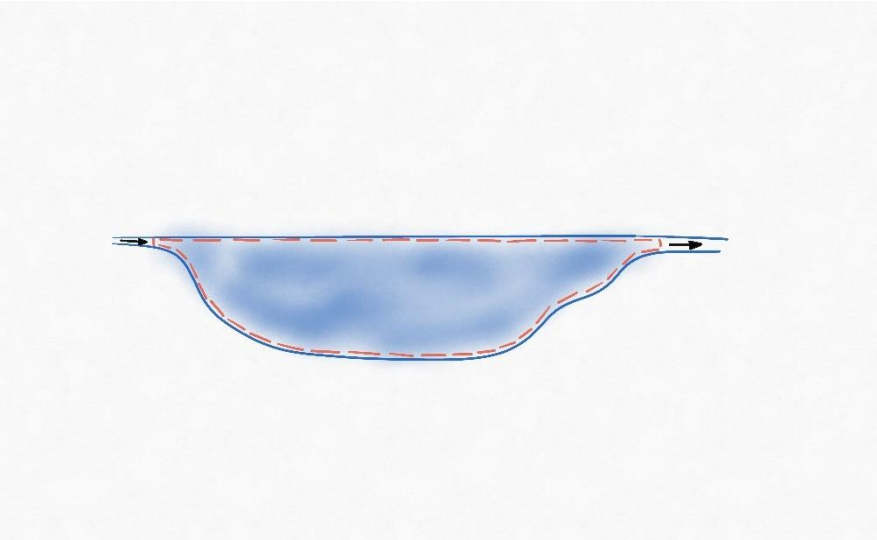


Abbildung 4: Systemgrenze Obersee

3.2 Energiehaushalt

An den Systemgrenzen wird ständig Energie ausgetauscht. Dies findet an der Wasseroberfläche, als auch beim Gewässerbett und den Zu- und Abflüssen statt. Folgende Energieströme in W/m^2 werden festgehalten:

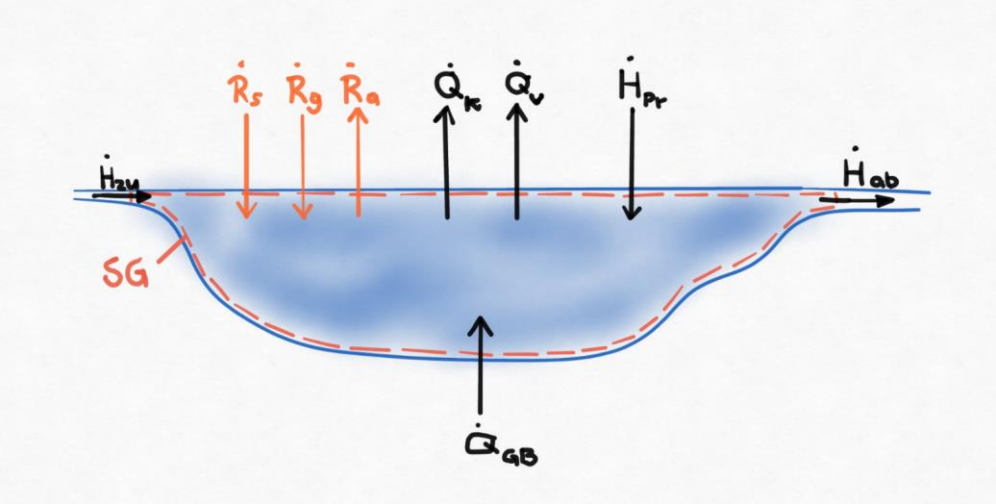


Abbildung 5: Energieströme über die Systemgrenze

Bei den orangen Termen handelt es sich um lang- und kurzwellige, elektromagnetische Strahlung. $\dot{R}_g$ist die langwellige, absorbierte Gegenstrahlung. $\dot{R}_S$ ist die kurzwellige Globalstrahlung. $\dot{R}_a$ ist die langwellige Ausstrahlung. Diese Terme werden bei der Energiebilanz unter dem Term $\sum \dot{Q}_{SB}$ zusammengefasst. $\dot{Q}_K$ ist der Wärmestrom, der durch Konvektion entsteht. $\dot{Q}_V$ ist der durch Verdunstung entstehende Wärmestrom. $\dot{Q}_{GB}$ ist der Wärmestrom durch das Gewässerbett. Bei $\dot{H}_{zu}$ und $\dot{H}_{ab}$ handelt es sich um Enthalpieströme, die durch den Zufluss vom Tomelibach und Abfluss vom Mittelbach, sowie durch allfällige, weitere unterirdische Zu- und Abflüsse (z.B. Grundwasser) entstehen. Der Enthalpiestrom $\dot{H}_{pr}$ steht für den Niederschlag, der auf den See fällt. Die Wärme- und Enthalpieströme sind je nach Jahreszeit und Wetter positiv oder negativ. Negativ bedeutet ein Energieaustrag über die Systemgrenze, während positiv für Energieeinträge über die Systemgrenze stehen.

Sämtliche kinetische Energieeinträge (Zuflüsse, Niederschlag), als auch die Einträge durch Strahlung werden in Wärme umgewandelt. Solange die Temperatur des Wassers über 0°C ist, handelt es sich um sensible Wärme, d.h. je nach Vorzeichen um eine Aufwärmung oder Abkühlung des Wassers. Hat das Wasser eine Temperatur von °C, handelt es sich um latente Wärme, die zum Phasenwechsel von flüssig zu fest (in Eis) oder umgekehrt - je nach Vorzeichen - benötigt wird. Dies zeigt nachfolgendes Diagramm:

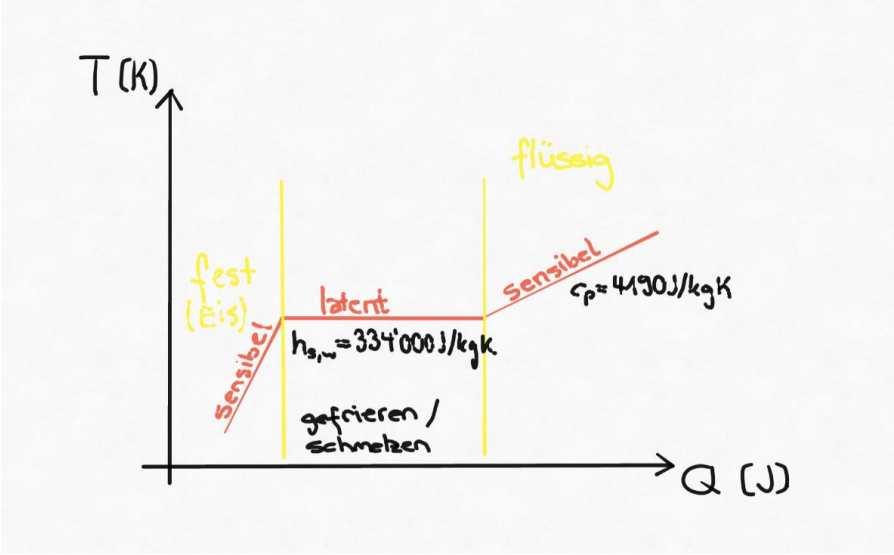


Abbildung 6: Latente und sensible Wärme

Verdeutlicht werden diese Wärmeein- und austräge auch in der nachfolgenden Energiebilanz. Dabei handelt es sich um eine spezifische Energiebilanz, bezogen auf die (See-)Fläche [1/m^2].

$$\sum \dot{Q}_{SB} + \dot{Q}_K + \dot{Q}_V + \dot{H}_{zu} + \dot{H}_{ab} + \dot{H}_{pr} = \underbrace{c_{p,W} * \rho_W * \frac{d(z * T_W)}{dt}}_{\text{Sensible Wärme}} + \underbrace{h_{s,W} * \rho_E * \frac{dz}{dt}}_{\text{Latente Wärme}}$$

In Kapitel 4 wird sich dann noch zeigen, dass es aber nicht ganz einfach ist, die aufzuwärmende Schichtdicke zu ermitteln, die nicht der maximalen Tiefe des Sees entspricht, da die Durchmischung unvollständig ist.

3.2.1 Beispiel Zürichsee

In der nebenstehenden Grafik ist durchschnittliche, jährliche Wärmebilanz vom Zürichsee abgebildet. Dabei sind die Variablen folgendermassen zugeordnet:

- H_A Langwellige, absorbierte Gegenstrahlung [W/m^2]
- H_S Kurzwellige Globalstrahlung [W/m^2]
- H_W Langwellige Ausstrahlung [W/m^2]
- H_K Konvektions-Wärmestrom [W/m^2]
- H_V Verdunstungs-Wärmestrom [W/m^2]
- H_{tot} Totaler Wärmestrom [W/m^2]

Dabei wird der Wärmeverlust durch die Schneeschmelze sowie der Wärmestrom durch das Gewässerbett nicht berücksichtigt. Sie sind beide vernachlässigbar aufgrund deren kleinen Beträge. Der Wärmeverlust durch die Schneeschmelze erreicht im Januar beispielsweise einen maximalen Wert von -3 W/m^2. Allgemein ist ersichtlich, dass die Zu- und Abflüsse bei dieser Bilanz kaum ins Gewicht fallen. Die grössten Beiträge entstehen durch die langwellige Gegenstrahlung und Ausstrahlung, sowie der kurzwelligen Globalstrahlung.

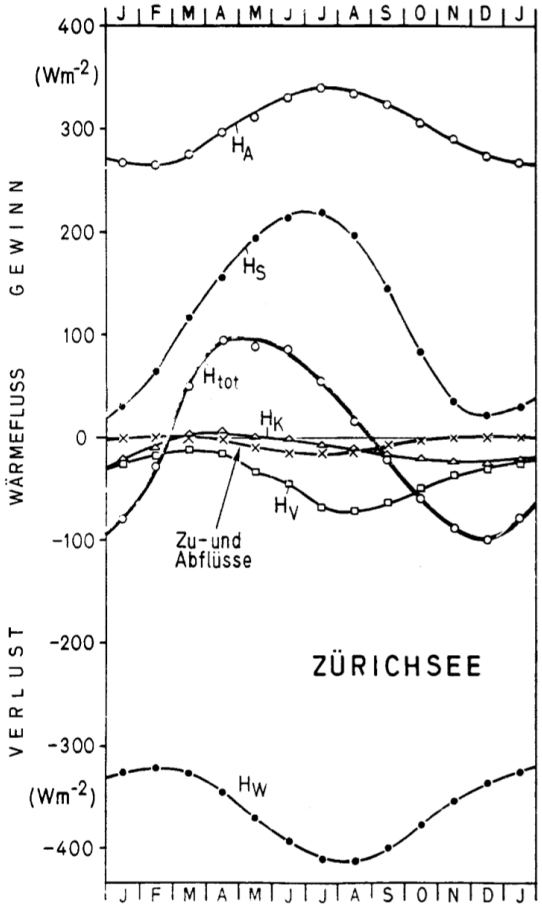


Abbildung 7: Wärmebilanz Zürichsee [Brennwald, 2012]

3.3 Vereinfachung des Systems

Aufgrund dessen, dass einige Wärme- und Enthalpieströme in der Bilanz vernachlässigbar klein sind (gem. Kap. 3.2.1) und auch Daten wie Volumenströme und Temperaturen der Zu- und Abflüsse zum Obersee fehlen, wird die Bilanz vereinfacht. Dies betrifft einerseits sämtliche Zu- und Abflüsse ($\dot{H}_{zu}$ und $\dot{H}_{ab}$) und andererseits den Wärmeaustausch mit dem Gewässerbett. Sie werden vernachlässigt. Folgende Auswirkungen hat dieser Entscheid:

- Vor allem im Frühling kann die Vernachlässigung des Zuflusses (Tomelibach) eine grössere Abweichung von der Realität bedeuten, da dann grosse Mengen an kaltem Schmelzwasser in den doch eher kleinen See fliessen.
- Im Winter wird es durch die Vernachlässigung des Gewässerbetts und auch des Abflusses zu grossen, negativen, totalen Wärmeströmen kommen. Sie werden durch den Wärmeeintrag des Gewässerbetts und auch durch den negativen Enthalpiestrom beim Abfluss (Mittelbach) in der Realität gemindert.

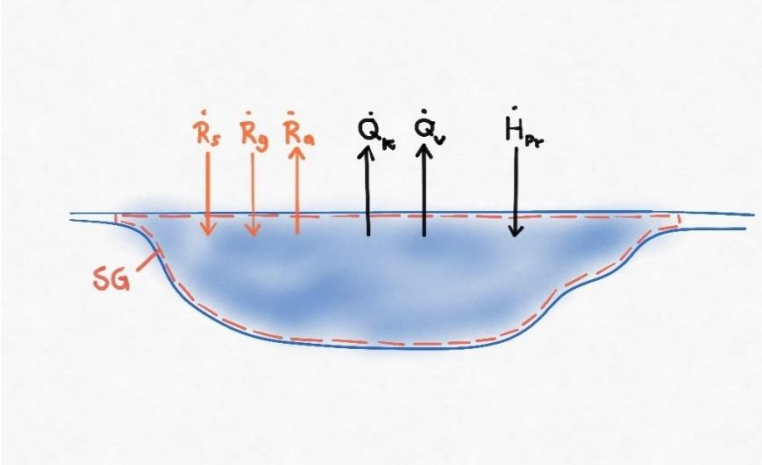


Abbildung 8: Vereinfachtes System mit den Energieströmen

Die Bilanz sieht nun folgendermassen aus:

$$\sum \dot{Q}_{SB} + \dot{Q}_K + \dot{Q}_V + \dot{H}_{pr} = c_{p,W} * \rho_W * \frac{d(z * T_W)}{dt} + h_{s,W} * \rho_E * \frac{dz}{dt}$$

3.4 Energieströme

In der untenstehenden Grafik ist die Energiebilanz für den Obersee am Beispiel für das Jahr 2030 (vom 01.11.30-31.10.31) dargestellt. Dabei zeigt der Totale Wärmestrom, ob die Bilanz nach Addierung der einzelnen Wärmeein- und austräge gesamthaft positiv (Wärmeeintrag) oder negativ (Wärmeaustrag) ist.

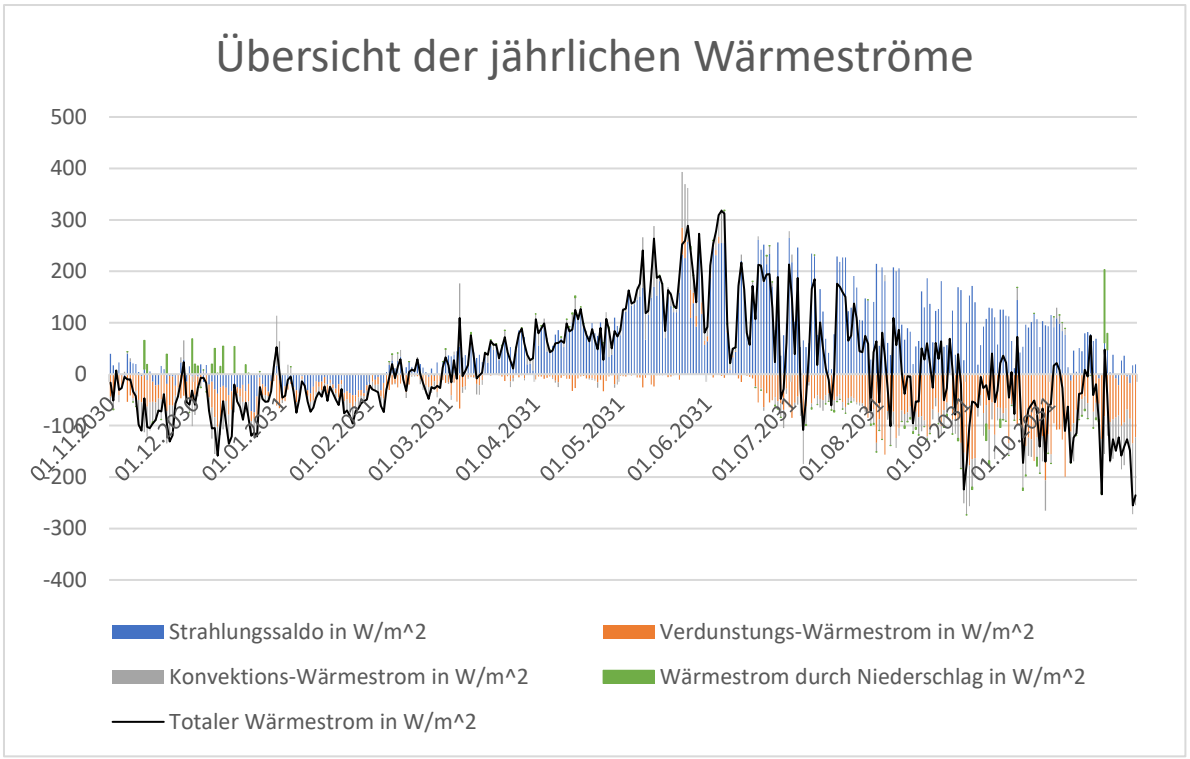


Abbildung 9: Voraussichtliche Energiebilanz im Jahr 2030

Den Verlauf der einzelnen Terme dargestellt im Liniendiagramm:

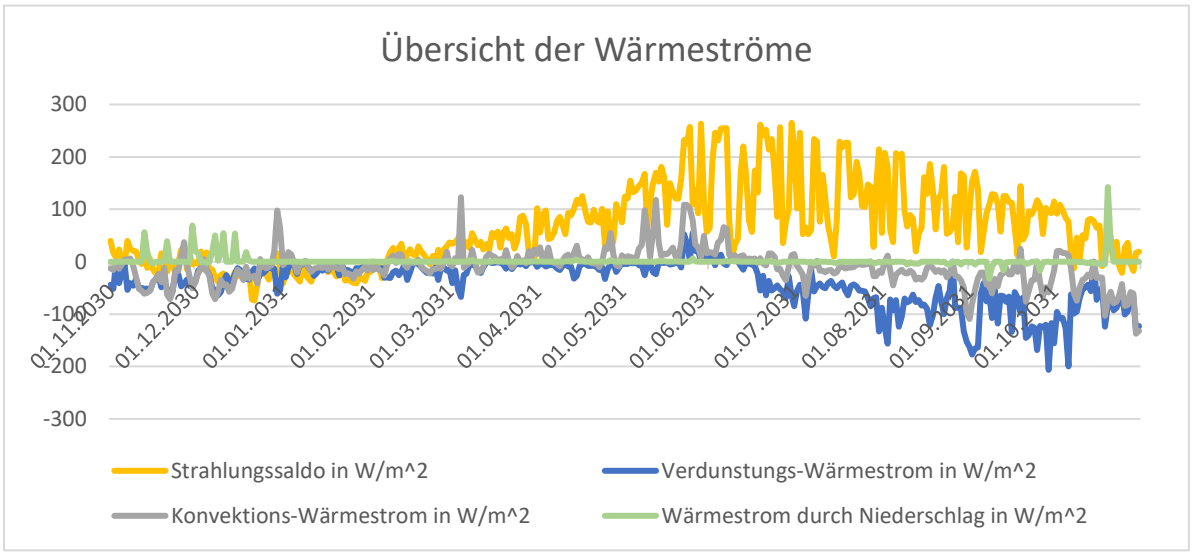


Abbildung 10: Detaillierte, voraussichtliche Wärmeströme im Liniendiagramm für das Jahr 2030

In den folgenden Kapiteln wird detailliert auf die Herkunft und Berechnung der einzelnen Wärme- und Enthalpieströme eingegangen.

3.4.1 Strahlung

Der Einfluss der Sonne auf den Wärmehaushalt des Sees wird durch das Strahlungssaldo $\dot{Q}_{SB}$ ausgedrückt. Es handelt sich dabei um die Summe aus kurz- und langwelliger Strahlung.

$$\dot{Q}_{SB} = \dot{R}_{SB} = \dot{R}_H + \dot{R}_I + \dot{R}_G - \dot{R}_R - \dot{R}_A = (1 - a_r) * \dot{R}_S + \varepsilon * \dot{R}_G - \dot{R}_A = \frac{W}{m^2}$$

$\dot{R}_H$: Ungerichtete, kurzwellige (diffuse) Himmelsstrahlung [W/m^2]

$\dot{R}_I$: Direkte, kurzwellige Himmelsstrahlung auf die Horizontalebene [W/m^2]

$\dot{R}_G$: Atmosphärische, langwellige Gegenstrahlung [W/m^2]

$\dot{R}_R$: Reflexionsstrahlung [W/m^2]

$\dot{R}_A$: Langwellige Ausstrahlung der Erdoberfläche [W/m^2]

$\dot{R}_S$: Kurzwellige Globalstrahlung ($= \dot{R}_H + \dot{R}_I$) [W/m^2]

a_r: Albedo (Reflexionsvermögen) [-]

ε: Emissivität der Oberfläche [-]

Die Emissivität ε hängt von der Oberfläche ab. Sie ist bei Wasser und Eis 0.97, bei Schnee 0.8. Der Albedo-Wert a_r hängt von der Oberfläche und dem Strahlungs-Einfallswinkel ab. Die verwendeten Werte sind in folgender Tabelle dargestellt:

Oberfläche	Albedo a_r in [−]
klare Gewässer[a]:	
April–August	0,06
September	0,07
Febr., Okt.	0,09
Nov., Jan.	0,11
Dezember	0,12
dunkle Ackerböden (gepflügt)	0,05…0,15
Gras, Kartoffeln, Rüben, Stoppeln	0,15…0,25
Nadelwald	0,10…0,15
Laubwald (Sommer)	0,10…0,20
Altschnee (schmutzig)	0,40…0,60
Neuschnee (trocken)	0,70…0,90

[a] Verschmutzte Gewässer 0,02 bis 0,03 größer als klare Gewässer

Tabelle 2: Albedo-Werte [Maniak, 2013]

Die kurzwellige Globalstrahlung $\dot{R}_S$ wird gemessen, bzw. liefert das CH2018-Modell. Die langwellige Gegenstrahlung $\dot{R}_G$ entsteht durch die Rückstrahlung der Atmosphäre infolge des Wasserdampfs und anderen Gasen, bzw. Partikel. Je höher der Bewölkungsgrad, desto höher die langwellige Gegenstrahlung $\dot{R}_G$. Da hierbei keine Messungen vorliegen, wird in dieser Arbeit ein empirischer Ansatz hinzugezogen, der auf den Grundlagen von Stefan-

Bolzmann bei wolkenlosem Himmel $\dot{R}_{G0} = \varepsilon * \sigma * T_w^4$ beruht. Es wird die Formel von Angström verwendet:

$$\dot{R}_G = \sigma * (T_W + 273.15)^4 * (0.82 - 0.25 * 10^{-0.0945 * e_{aL}}) * (1 + b * w^d) = \frac{W}{m^2}$$

Mit dem Gesetz von Dalton gilt über Wasser: $e_{sL} = 6.122 * e^{17.62 * \frac{T_L}{272.62 + T_L}}$

$$e_{aL} = \varphi * \frac{e_{sL}}{100}$$

Über Eis gilt bei $T_L < 0.01°C$: $e_{sL_Eis} = 6.122 * e^{22.46 * \frac{T_L}{272.62 + T_L}}$

Über Eis gilt bei $T_L \geq 0.01°C$ $e_{sL_Eis} = 6.122\ hPa$

$$e_{aL_Eis} = \varphi * \frac{e_{sL_Eis}}{100}$$

σ: Stefan-Boltzmann-Konstante $\sigma = 5.67 * 10^{-8}$ [$Wm^{-2}K^{-4}$]

T_W: Wassertemperatur [°C]

e_{aL_Eis}: Wasserdampfdruck der Luft (Partialdruck) über Eis [hPa]

e_{aL}: Wasserdampfdruck der Luft (Partialdruck) über Wasser [hPa]

b: Relativer Bewölkungsgrad [-]

w: Modalwert der Windfunktion $w = 1$

d: Modalwert der Windfunktion $d = 0.3$

e_{sL_Eis}: Sättigungsdampfdruck von Luft über Eis [hPa]

e_{sL}: Sättigungsdampfdruck von Luft über Wasser [hPa]

φ: Relative Luftfeuchtigkeit [%]

Die langwellige Ausstrahlung $\dot{R}_A$ berechnet sich als Temperaturstrahlung nach Stefan-Boltzmann durch:

$$\dot{R}_A = \varepsilon * \sigma * (T_w + 273.15)^4 = \frac{W}{m^2}$$

Der jährliche Strahlungs-Verlauf in Arosa wird in der nachfolgenden Abbildung aufgezeigt.

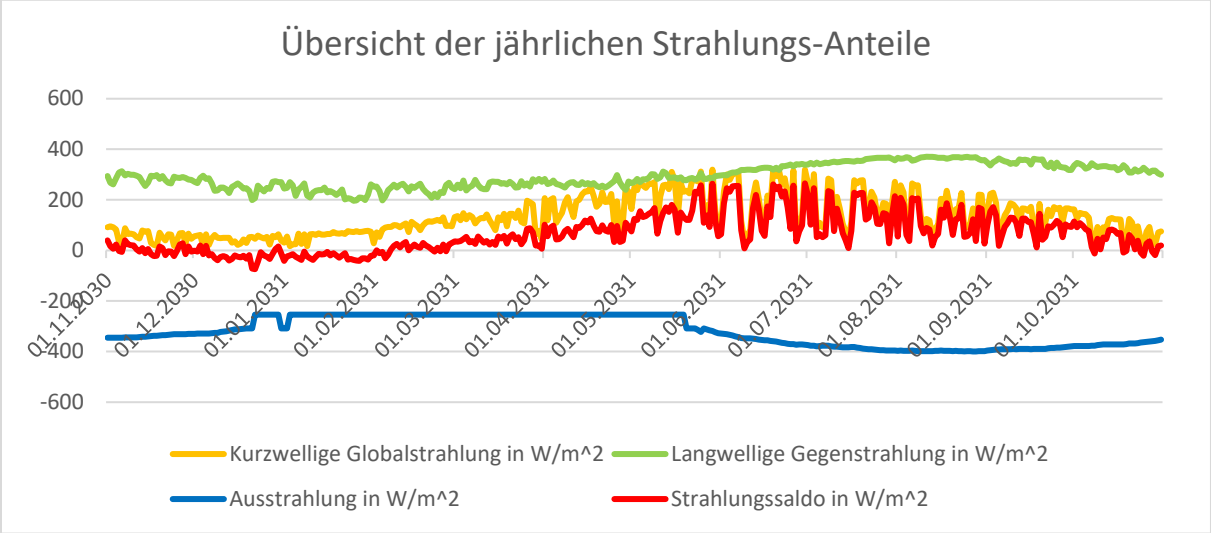


Abbildung 11: Strahlungs-Anteile am Jahres-Beispiel 2030/2031

3.4.2 Verdunstung

Durch die Verdunstung entsteht ein Wärmeverlust des Sees. Dieser wird im Term $\dot{Q}_V$ berücksichtigt. Prinzipiell kann auch Taubildung (Wärmegewinn des Wassers) vorkommen, das wird aber nicht berücksichtigt. Für diese Arbeit wird der empirische Ansatz von Trabert verwendet. Über **Wasser** gilt:

$$\dot{Q}_V = \frac{31700}{3600} * u^{0.5} * (e_{aL} - e_{sW}) = \frac{W}{m^2}$$

mit dem Gesetz von Dalton

$$e_{sW} = 6.122 * e\text{^}(17.62 * \frac{T_W}{243.12 + T_W})$$

u: Windgeschwindigkeit, 2m über Boden gemessen [m/s]

e_{sW}: Sättigungsdampfdruck von Wasser [hPa]

Über **Schnee** und/oder **Eis** wird ein empirischer Ansatz angenommen, der eigentlich nur bei Advektionsbedingungen gilt, damit sich die Berechnung vereinfacht. Advektionsbedingungen sind hohe Windgeschwindigkeiten, mittlere bis hohe Lufttemperaturen, hoher Wasserdampfdruck und starker Regen. Eine genauere Berechnung ohne Advektionsbedingungen kann gemäss Anhang mit der Gradientenmethode durchgeführt werden. Die Resultate werden deshalb minim höher ausfallen als in der Realität. Die Formel nach Braun lautet:

$$\dot{Q}_V = 4.7 * u * \left(e_{aL_Eis} - e_{s_Eis_Schnee}\right) = \frac{W}{m^2}$$

$e_{s_Eis_Schnee}$: Sättigungsdampfdruck der schmelzenden Schneeoberfläche

mit $e_{s_Eis_Schnee} = 6.11\ hPa$

3.4.3 Konvektion

Konvektion ist der sensible (fühlbare) Wärmeübergang vom See an die Luft. Es wird angenommen, dass zwischen Verdunstung und Konvektion ein konstantes, nur vom Luftdruck abhängiges Verhältnis besteht. Nach Trabert gilt der Ansatz über **Wasser**:

$$\dot{Q}_K = 0.63 * \frac{T_W - T_L}{e_{sW} - e_{aL}} * \dot{Q}_V = \frac{W}{m^2}$$

T_L: Lufttemperatur [°C]

Der Faktor 0.63 ist von der Eawag für Luzern ermittelt worden und ist daher eine Annäherung.

Über **Schnee** und/oder **Eis** wird auch hier ein empirischer Ansatz angenommen, der eigentlich nur bei Advektionsbedingungen gilt. Eine genauere Berechnung ohne Advektionsbedingungen kann gemäss Anhang mit der Gradientenmethode durchgeführt werden. Die Resultate werden deshalb minim höher ausfallen als in der Realität. Die Formel nach Braun lautet:

$$\dot{Q}_K = 3.1 * u * T_L = \frac{W}{m^2}$$

3.4.4 Niederschlag

Niederschlag wird in zwei Formen angenommen. Dabei handelt es sich um Regen, wenn die Lufttemperatur über 0°C ist und um Schnee, wenn die Temperatur tiefer gleich 0°C ist. Dies ist eine Annahme für die folgenden Berechnungen. Die Realität kann davon abweichen. Für **Regen** gelten die nachfolgenden Bedingungen.

- Wenn der See noch nicht gefroren ist:

$$\dot{H}_{pr} = \dot{Q}_{pr} = \frac{c_{pW} * pr * 0.001 * \rho_W * (T_L - T_W)}{24 * 3600} = \frac{W}{m^2}$$

c_{pW}: Isobare Wärmekapazität von Wasser $c_{pW} = 4190 \frac{J}{kg*K}$

pr: Niederschlagsmenge [mm]

ρ_W: Dichte von Wasser $\rho_W = 997 \frac{kg}{m^3} = konstant$

- Wenn der See gefroren ist und/oder schneebedeckt ist:

$$\dot{H}_{pr} = \dot{Q}_{pr} = \frac{c_{pW} * pr * 0.001 * \rho_W * T_L}{24 * 3600} = \frac{W}{m^2}$$

Für **Schnee** wird angenommen, dass 1 mm Regen einer Schneedecke von 20mm bei einer Dichte von 200 $\frac{kg}{m^3}$ entspricht. Folgende Bedingungen gelten.

- Wenn der See noch nicht gefroren ist (Schnee schmilzt):

$$\dot{H}_{pr} = \dot{Q}_{pr} = \frac{h_{sW} * pr * 0.02 * \rho_S * T_L}{24 * 3600} = \frac{W}{m^2}$$

h_{sW}: Schmelzenthalpie von Wasser $h_{sW} = 314000 \frac{J}{kg}$

ρ_S: Dichte von Schnee $\rho_S = 200 \frac{kg}{m^3} = konstant$

- Wenn der See gefroren und/oder schneebedeckt ist:

$$\dot{H}_{pr} = \dot{Q}_{pr} = 0 = \frac{W}{m^2}$$

4. Nutzungsrelevante Prozesse

4.1 Wassertemperatur im Jahresverlauf

Dank der hohen Wärmekapazität von Wasser speichert ein See eine grosse Menge an Wärme. Er nimmt im Frühling und Sommer Wärme auf und gibt sie im späten Herbst und Winter wieder ab. Dieser Austausch erfolgt langsam. Damit ändert sich die Wassertemperatur saisonal und «hinkt» der Lufttemperatur etwas nach. Auch im Tagesverlauf ändert sich die Wassertemperatur viel weniger als die Lufttemperatur. In der nachfolgenden Abbildung wird dies am Beispiel vom Zürichsee im Jahr 2018 verdeutlicht. Vom Obersee sind keine Aufzeichnungen der Wassertemperatur vorhanden. Es handelt sich hierbei um die täglichen, oberflächennahen Mittelwerte von Luft- und Wassertemperatur.

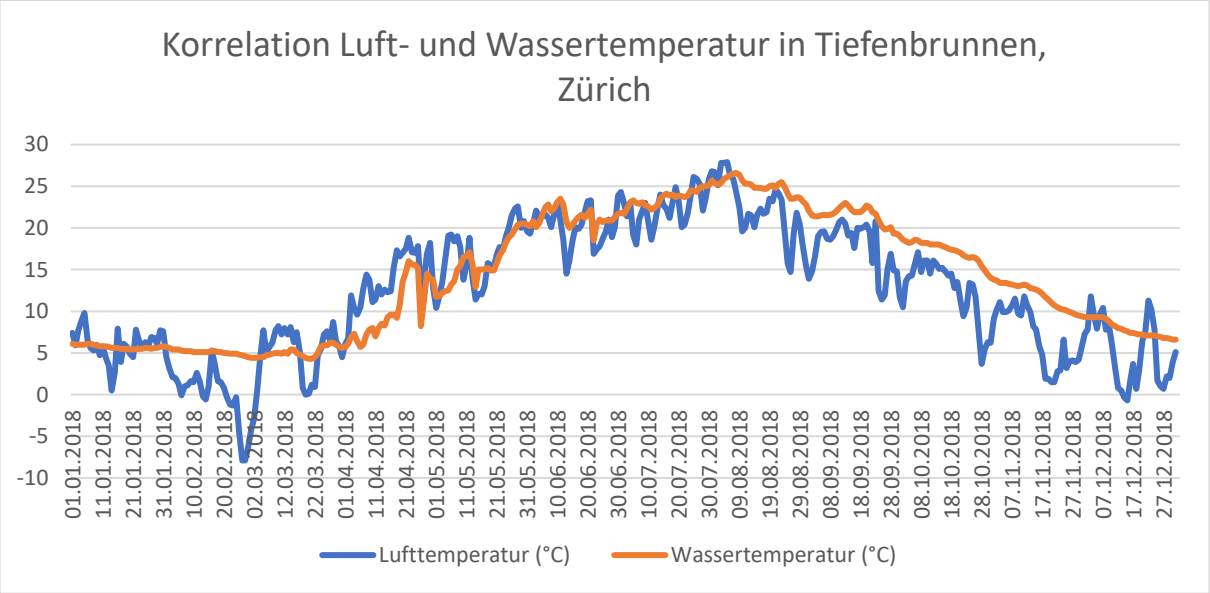


Abbildung 12: Durchschnittlicher, oberflächennaher Wasser- und Lufttemperaturverlauf im Jahr 2018

Der vertikale Temperaturverlauf verläuft in Seen nicht homogen, ausser sie sind sehr seicht (Teiche bis max. 2m Tiefe), was für den Obersee nicht zutrifft. Der Wind und die damit entstehenden Wellen können das gesamte Volumen nicht jederzeit vollständig durchmischen. Damit ist es nicht möglich, den Wärmeeintrag (siehe Kapitel 3.2) direkt als Temperaturveränderung des kompletten Seevolumens oder nur der Seeoberfläche abzuhandeln. Davon abhängig, wie stark sich die Temperatur der Seeoberfläche aufwärmt, ist die Tatsache, wie viel der eingetragenen Wärme in tiefere Wasserschichten transportiert wird. Dafür wiederum verantwortlich ist vor allem der Wind. Dies wird in einem späteren Kapitel bei der Simulation des Wassertemperatur- und Eisverlaufs noch zu einer Herausforderung.

Eine spezielle Eigenschaft von Wasser ist, dass es die höchste Dichte bei 4 °C besitzt und die Dichte damit in beide Temperatur-Richtungen sinkt. Diese Eigenschaft ist verantwortlich für die vertikale Temperaturverteilung im See. Das Tiefenwasser verharrt während sämtlicher Jahreszeiten im Zustand maximaler Dichte. Der Wärmeaustausch des Sees mit dessen Umgebung findet hauptsächlich über die Seeoberfläche statt. Durch den Wärmeeintrag im

Sommer durch Strahlung, etc. entsteht warmes, leichtes Wasser an der Oberfläche. Das führt zu einer stabilen Schichtung und verhindert das Vordringen von warmem Wasser in tiefere Bereiche. Im Winter dagegen schwimmt kälteres Wasser (und Eis) über dem Tiefenwasser. Das nennt man Temperaturinversion. Auch hier führt die stabile Schichtung dazu, dass kaltes Wasser nicht in tiefe Bereiche vordringt. Die Abkühlung des Sees durch den Wärmeaustrag geht fast vollständig in das Oberflächenwasser ein. Das führt zu einer raschen Abkühlung und begünstigt die Eisbildung. Verdeutlicht wird dieser physikalische Prozess in der folgenden Abbildung.

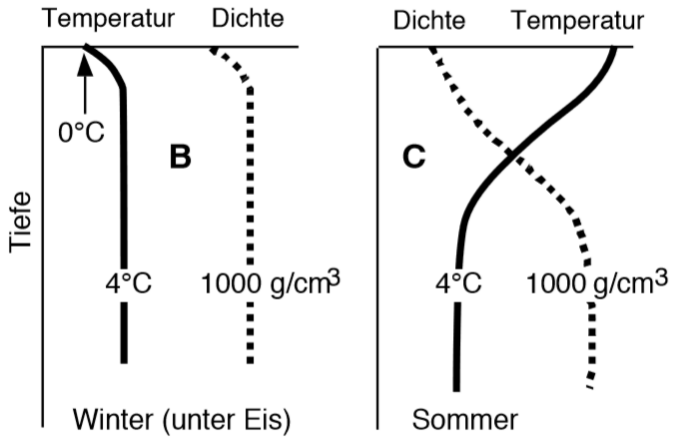


Abbildung 13: Temperatur- und Dichteverlauf in einem See im Winter und Sommer [Brennwald, 2012]

Eine vollständige Durchmischung des Obersees kommt aufgrund dessen niedrigen Tiefe im Frühling und im Herbst vor. Anfangs Herbst, beginnt sich die Oberfläche abzukühlen und der Dichteunterschied zwischen Oberflächenschicht und Tiefenwasser wird geringer. Es setzt eine Konversion ein und mit Hilfe des Windes durchmischt sich der See aufgrund der geringen Tiefe vollständig, bis das Wasser auf allen Tiefen 4 °C warm ist. Danach beginnt die Temperaturinversion und das kältere Wasser mit der tieferen Dichte steigt nach oben. Im Frühling ist dasselbe zu beobachten, nur dass sich die Oberfläche nach Auflösung der Eisschicht aufzuwärmen beginnt.

Die vertikale Temperaturschichtung des Sees wird in verschiedene Zonen mit unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften unterteilt. Die Sprungschicht ist diejenige Zone, bei welcher im Sommer die Wassertemperatur mit zunehmender Tiefe stark abfällt. Die Zone über der Sprungschicht heisst Epilimnion und die darunterliegende heisst Hypolimnion.

Das nachstehende, saisonale Temperaturprofil vom Vierwaldstättersee ist für den Obersee zwar nicht eins zu eins übernehmbar, aber es verdeutlicht das oben genannte. Der Vierwaldstättersee ist mit einer Tiefe von 214m beim Kreuztrichter einiges tiefer als der Obersee.

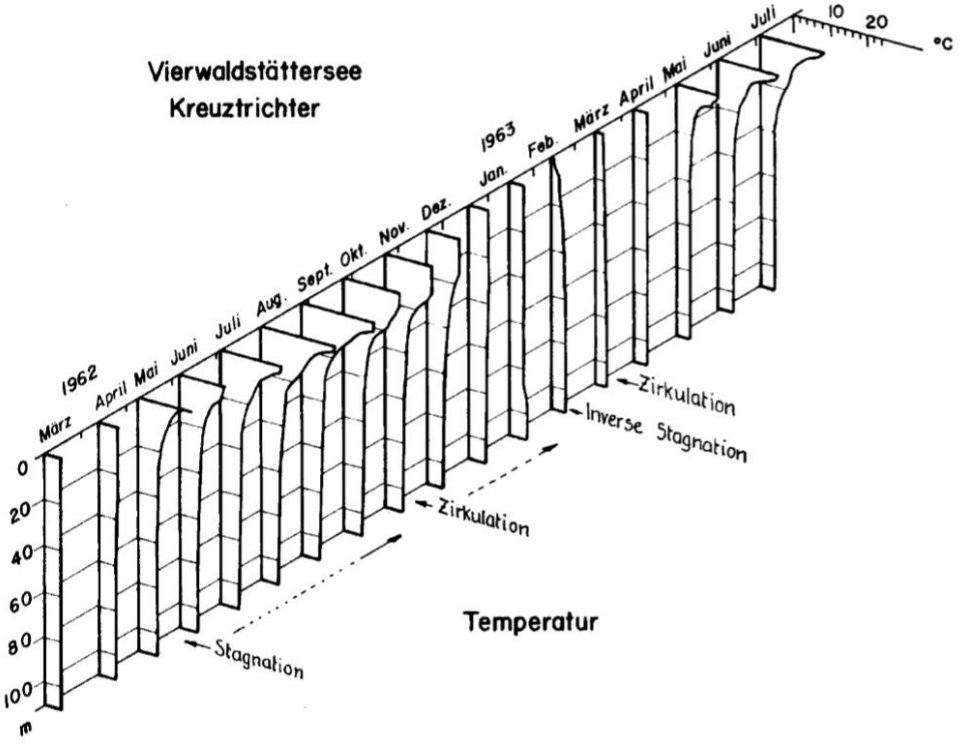


Abbildung 14: Vertikaler Temperaturverlauf des Vierwaldstättersees im Laufe der Jahreszeiten [Brennwald, 2012]

4.2 Eisbildung

Wenn die Wassertemperatur der Oberfläche auf 0 °C gesunken ist und ein Wärmeaustrag (negativer Wärmestrom) besteht, beginnt der See zu gefrieren. Die Eisbildung beginnt an Kristallisationskeimen wie Schwebestoffteilchen und setzt vom Ufer her ein. Bei der Kristallisation wird Wärme von 334'000 J/kg frei, die durch den Wärmeaustrag abtransportiert werden muss, damit fortlaufend Eis entsteht. Die Eisdecke stellt einen Wärmeschutz für das darunter liegende Wasser dar, was wiederum dazu führt, dass dies nur langsam abkühlt. Stehendes Wasser gefriert von oben nach unten.

Aufgrund dessen, dass die Eisfläche vom Obersee für die Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden will, wird der Eisaufbau von Beginn an von Angestellten der Gemeinde geprüft und dokumentiert. Der See wird ab 15 cm Eisdicke freigegeben, insofern sie homogen aufgebaut ist und keine auf dessen Stabilität negativ einwirkende Schichten wie Eisbrei oder ähnliches enthält. Für diese Arbeit sind Aufzeichnungen vorhanden, die den Eisaufbau ab Mitte November bis Ende Januar 2018 beschreiben, die als Grundlage verwendet werden. Folgende Grafik zeigt die fortschreitende Eisfläche zwischen 19. November (Beginn der Eisbildung) und 12. Dezember 2018 (vollständig zugefroren).

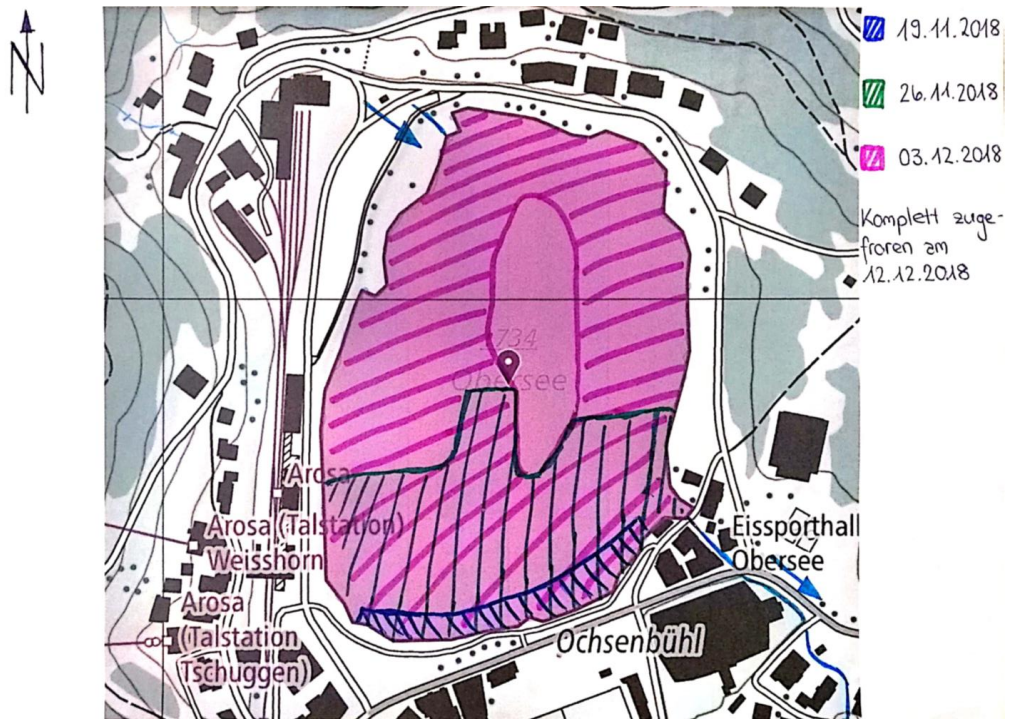
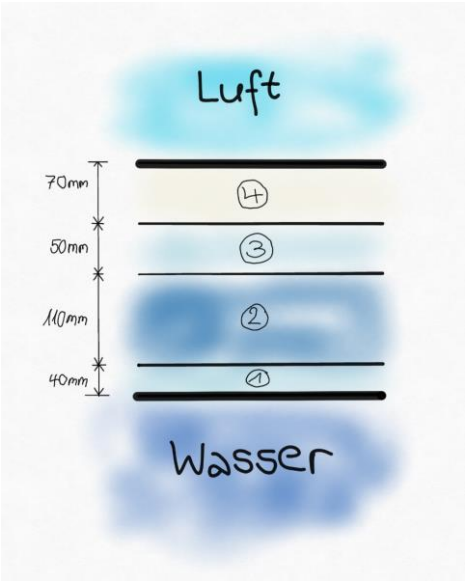


Abbildung 15: Fortlaufende Eisbildung im November/ Dezember 2018

Die Eisbildung setzt im Süden ein und setzt sich in Richtung Norden fort. Der Grund dafür kann einerseits das weniger turbulente Oberflächenwasser sein und/oder der grössere Wärmeaustrag durch Abschattung, mehr Wind, etc.

Der Aufbau der Eisfläche ist nicht zwingend homogen. Fällt in der Aufbauphase Schnee oder Regen, führt dies zu breiartigen, trüben Zwischenschichten. Dies führt einerseits dazu, dass das Eis nicht mehr durchsichtig erscheint und andererseits kann es zu Festigkeitsverlust führen. Auch kann eine plötzliche Wärmeperiode die Eisschicht auch kurzfristig schmelzen lassen. Als Beispiel wird nun der Eisaufbau von 18. Dezember 2018 aufgezeigt, wie er von einem Mitarbeiter der Gemeinde Arosa aufgefasst wurde:



(1) Unstabile, weiche Eisschicht

(2) Wasser/ Eisbrei

(3) Unstabile, weiche Eisschicht

(4) Pulverschnee

Abbildung 16: Eisaufbau am 18.12.2018 gemäss Gemeinde Arosa

4.3 Simulation

Der natürliche Verlauf von Wassertemperatur, Eis- und Schneedicke wurde mit Matlab simuliert. Die dafür grundlegenden Formeln wurden im Kapitel 3 beschrieben. Die Programme und die verwendeten CH2018-Modell-Daten sind im digitalen Anhang zu finden.

Aus Gründen des unklaren Wärmedurchgangs durch Schnee und Eis wurden zwei Simulationen durchgeführt. Eine Simulation zieht den Niederschlag in die Berechnung ein, die andere nicht. Die Realität liegt irgendwo zwischen beiden Simulationen. Die Eisdicke in der Simulation ohne Schnee wird zu gross, wohingegen die Eisschicht mit Niederschlag zu klein wird.

Die Randbedingungen als auch die Simulations-Ergebnisse, sowie deren Auswertung werden in den folgenden Kapiteln aufgezeigt.

4.3.1 Randbedingungen Simulation «Ohne Niederschlag»

Folgende Randbedingungen gelten für diese Simulation:

1.) Es fällt **kein Niederschlag**. Aufgrund dem im Mittel kleinen Temperaturunterschied zwischen der Wasseroberfläche und der unteren Luftschicht hat dies kaum Einfluss auf das Bilanztotal (Wärmeein- oder austrag). Der Unterschied ist nur an den wenigen Tagen feststellbar, wo Schnee ins Wasser oder Regen auf Schnee fällt, da dort Schmelzenthalpie frei wird. Durch den Fakt, dass kein Schnee auf die Eisfläche fällt, entfällt der isolierende Effekt des Schnees. Der Wärmedurchgang ist zu gross und führt zu einer zu grossen Eisdicke.

2.) Es werden **konstante Bedingungen für jedes Oberflächenelement** angenommen. An jedem Ort herrscht dieselbe Windgeschwindigkeit, Luft- und Wassertemperatur, etc. In der Realität gibt es lokale Unterschiede, diese gleichen sich im Mittel jedoch weitgehend aus, sodass hierbei keine grösseren Abweichungen von der Realität angenommen werden müssen. Das bedeutet auch, dass die Eisbildung überall gleichzeitig beginnt und im Mittel angegeben wird.

3.) Die temperaturabhängigen **Stoffeigenschaften** werden als **konstant** angenommen. Dies betrifft zum Beispiel die Dichte oder Wärmekapazität von Wasser, Schnee und Eis.

4.) Die **abzukühlende Oberflächenschicht** wird mit **2 m** angenommen. Darunter bleibt das Tiefenwasser 4 °C und erfährt keine Temperaturänderung.

5.) Die im Sommer **aufzuwärmende Oberflächenschicht** wird mit **5 m** angenommen. Darunter bleibt das Tiefenwasser 4 °C (ggf. etwas mehr) und erfährt keine Temperaturänderung. Damit wird diese stabile Schichtung grösser als diejenige im Winter angenommen.

6.) Ausgangslage ist **Anfang November**. Abgeschätzt wird dann eine vollständige Durchmischung mit einem homogenen, vertikalen Temperaturverlauf von **4 °C**. Dies auf Grundlage der beginnenden Eisbildung ca. Mitte November, da keine Wassertemperatur-Aufzeichnungen zur Verfügung stehen.

7.) Der **Bedeckungsgrad** wird über das ganze Jahr mit **50%** angenommen, da hierbei keine Aufzeichnungen vorhanden sind. Der gesamte Wärmeaustrag führt zu einer **dem Betrag äquivalenten Eisschicht**. In der Realität ist der Wärmedurchgang durch das Eis jedoch schlecht und der Aufbau geht nur langsam voran.

8.) Es wird ein Wärmestrom eingefügt, der Wärmeeinträge über das Gewässerbett und den Abfluss kompensieren soll. Er heisst in der Simulation «**sonstiger Wärmestrom**» und beträgt 35 W/m^2.

4.3.2 Randbedingungen Simulation «Mit Niederschlag»

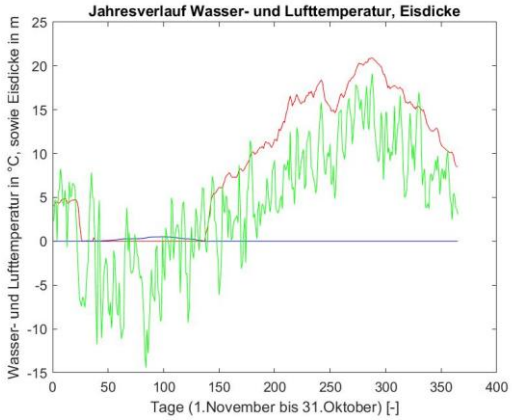
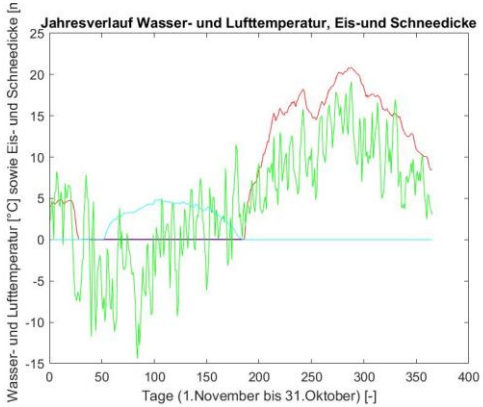
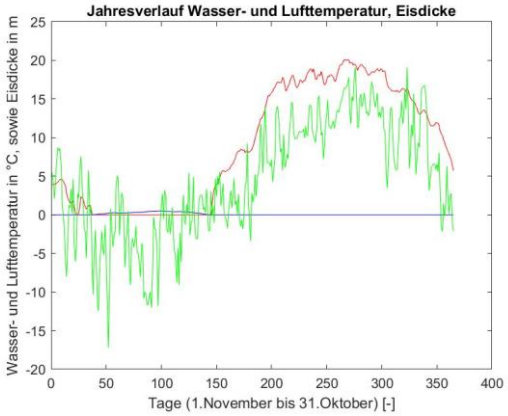
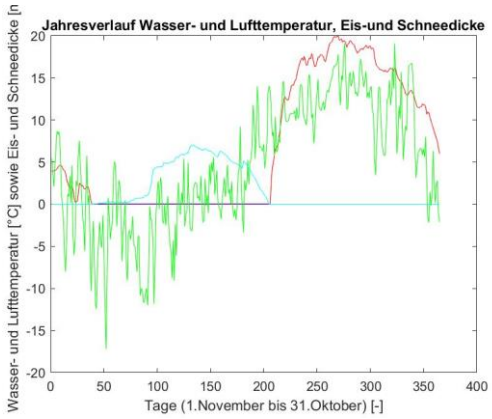
Folgende Randbedingungen gelten für diese Simulation:

1.) Es fällt **Niederschlag in zwei Formen**. Schnee, wenn die Lufttemperatur unter oder gleich 0 °C ist und Regen, wenn die Lufttemperatur über 0 °C ist. Der Niederschlag wird in die Bilanz einberechnet (Wärmeein- oder austrag), ausser wenn er in Form von Schnee auf eine Eis- oder Schneeoberfläche trifft. Dort ist der Temperaturunterschied im Mittel so klein, dass der Wärmeein-, bzw. austrag keine merkliche Änderung hat.
2.) **Schnee** wird als **totaler Isolator** angenommen. Ist einmal Schnee auf der Eisdecke, findet kein Wärmedurchgang mehr durch diese Schicht mehr statt. Der Eisaufbau stagniert.
3.) Es werden **konstante Bedingungen für jedes Oberflächenelement** angenommen. An jedem Ort herrscht dieselbe Windgeschwindigkeit, Luft- und Wassertemperatur, etc. In der Realität gibt es lokale Unterschiede, diese gleichen sich im Mittel jedoch weitgehend aus, sodass hierbei keine grösseren Abweichungen von der Realität angenommen werden müssen. Das bedeutet auch, dass die Eisbildung überall gleichzeitig beginnt und im Mittel angegeben wird.
4.) Die temperaturabhängigen **Stoffeigenschaften** werden als **konstant** angenommen. Dies betrifft zum Beispiel die Dichte oder Wärmekapazität von Wasser, Schnee und Eis.
5.) Die **abzukühlende Oberflächenschicht** wird mit **5 m** angenommen. Darunter bleibt das Tiefenwasser 4 °C und erfährt keine Temperaturänderung.
6.) Die im Sommer **aufzuwärmende Oberflächenschicht** wird mit **10 m** angenommen. Darunter bleibt das Tiefenwasser 4 °C (ggf. etwas mehr) und erfährt keine Temperaturänderung. Damit wird diese stabile Schichtung grösser als diejenige im Winter angenommen.
7.) Ausgangslage ist **Anfang November**. Abgeschätzt wird dann eine vollständige Durchmischung mit einem homogenen, vertikalen Temperaturverlauf von **4 °C**. Dies auf Grundlage der beginnenden Eisbildung ca. Mitte November, da keine Wassertemperatur-Aufzeichnungen zur Verfügung stehen.
8.) Der **Bedeckungsgrad** wird über das ganze Jahr mit **50%** angenommen, da hierbei keine Aufzeichnungen vorhanden sind.
9.) Der **Schnee unterkühlt** in der Simulation **nicht.** Das bedeutet, dass das ein negatives Bilanztotal mit einem Wärmeaustrag keinen Einfluss auf das System hat.
10.) Die Dicke der **Schneedecke addiert sich** jeweils bei Schneefall, ohne zu komprimieren. In der Realität würde die Schneedecke deshalb wesentlich kleiner sein.

4.3.3 Simulations-Ergebnisse

In der folgenden Tabelle sind die jährlichen Verläufe von Wasser- und Lufttemperatur sowie der Eis- und Schneedicke für verschiedene Jahre ersichtlich. Ein Jahr startet jeweils am 01. November bei angenommener, vollständiger Durchmischung bei 4 °C und endet am 31. Oktober. Um den klimatischen Trend an Beispielen darzustellen, werden die Jahre 2030/2031, 2060/2061 und 2098/2099 simuliert. Dabei ist die Simulation 2060/2061 stellvertretend für den Trend Mitte des 21. Jahrhunderts und die Simulation 2098/2099 ist stellvertretend für den Trend Ende des 21. Jahrhunderts.

Die rote Linie stellt den Verlauf der Wassertemperatur dar. Die grüne Linie zeigt die tägliche, durchschnittliche Lufttemperatur. Die dunkelblaue Linie stellt den Eisverlauf, bzw. die Eisdicke dar, während die hellblaue Linie den Schneeverlauf, bzw. die Schneedicke darstellt.

	Ohne Niederschlag		Mit Niederschlag	
2018/2019		**Beginn Eisbildung:** 28 Tage **Max. Eisdicke:** 0.519m **Eis geschmolzen:** 136 Tage **Max. Wassertemp.:** 20.9 °C		**Beginn Eisbildung:** 31 Tage **Max. Eisdicke:** 0.055 m **Eis geschmolzen:** 185 Tage **Max. Schneedicke:** 4.8 m **Max. Wassertemp.:** 20.8 °C
2030/2031		**Beginn Eisbildung:** 39 Tage **Max. Eisdicke:** 0.512m **Eis geschmolzen:** 143 Tage **Max. Wassertemp.:** 20.1 °C		**Beginn Eisbildung:** 40 Tage **Max. Eisdicke:** 0.041 m **Eis geschmolzen:** 205 Tage **Max. Schneedicke:** 7.04 m **Max. Wassertemp.:** 20 °C

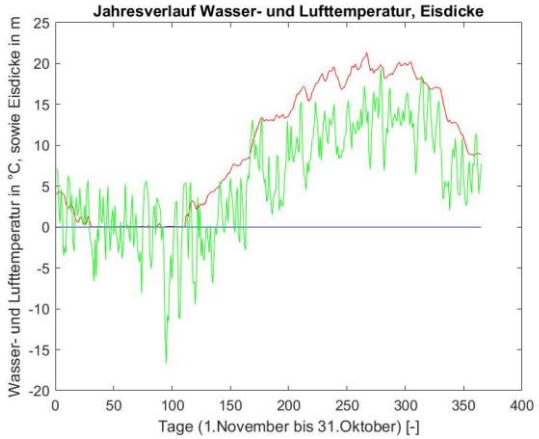
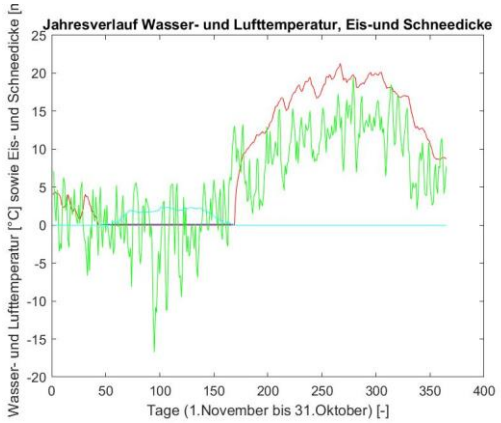
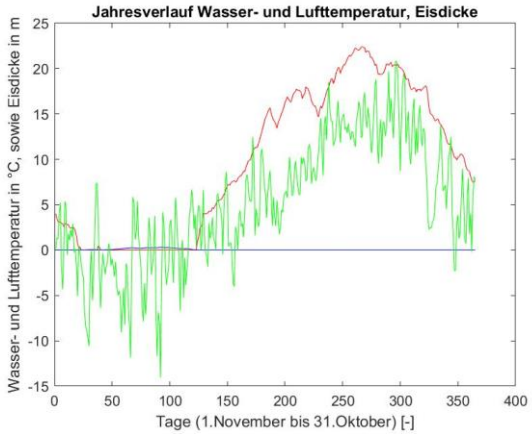
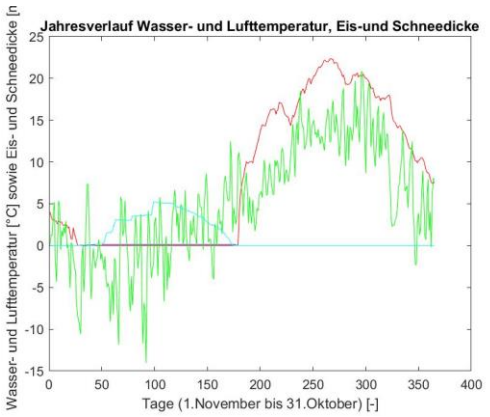
2060/2061		**Beginn Eisbildung:** 32 Tage **Max. Eisdicke:** 0.068m **Eis geschmolzen:** 110 Tage **Max. Wassertemp.:** 21.4 °C		**Beginn Eisbildung:** 44 Tage **Max. Eisdicke:** 0.104 m **Eis geschmolzen:** 168 Tage **Max. Schneedicke:** 2.38 m **Max. Wassertemp.:** 21.3 °C
2098/2099		**Beginn Eisbildung:** 27 Tage **Max. Eisdicke:** 0.299m **Eis geschmolzen:** 121 Tage **Max. Wassertemp.:** 22.4 °C		**Beginn Eisbildung:** 29 Tage **Max. Eisdicke:** 0.124 m **Eis geschmolzen:** 178 Tage **Max. Schneedicke:** 5.25 m **Max. Wassertemp.:** 22.4 °C

Tabelle 3: Simulations-Ergebnisse für den natürlichen Jahresverlauf von Wasser-, Lufttemperatur sowie Eis- und Schneedicke verschiedener Jahre

4.3.4 Erkenntnisse aus der Simulation

Vorab ist wichtig, dass die dargestellten Jahre nicht repräsentativ für alle Jahre im selben zeitlichen Horizont sind. Es gibt immer Jahre, die im Vergleich zu anderen zum Beispiel besonders warm, kalt oder niederschlagsreich sind. Aufgrund dessen, dass der Aufwand enorm wäre, sämtliche Jahre zu simulieren und dies in dieser Arbeit kein Schwerpunkt darstellt, sollen diese Jahre trotzdem als Trend angenommen werden. Ebenfalls ist zu erwähnen, dass das CH2018-Modell wie der Name sagt auf das Jahr 2018 «kalibriert» ist und die Werte in diesem Jahr am besten mit der Realität übereinstimmen sollten. Je weiter man sich auf der Zeitachse von diesem Jahr entfernt, desto unsicherer sind die Werte.

Im Folgenden werden die einzelnen simulierten Parameter einzeln ausgewertet.

Lufttemperatur

Deutlich ersichtlich ist, dass die tägliche, durchschnittliche Lufttemperatur von Tag zu Tag enorm differiert. Die kälteste Periode liegt bei allen Jahren zwischen Mitte Dezember und Mitte Februar, während die wärmste Periode in den Monaten Juli und August liegt. Die Jahresdurchschnitts-Temperatur steigt über die Jahre markant von 4.44 °C (2018/2019) über 5.56 °C (2060/2061) zu 5.25 °C (2098/2099).

Wassertemperatur

Die tägliche, durchschnittliche Wassertemperatur schwankt aufgrund der grossen Wärmekapazität von Wasser nur wenig von Tag zu Tag. Auch die Modelle unterscheiden sich hierbei kaum. Die Wassertemperatur sinkt jeweils von der Ausgangslage 4 °C anfangs November auf 0 °C, wo die Eisbildung beginnt. Solang es Eis hat, bleibt die Temperatur bei 0 °C, bevor sie im Frühling oder in warmen, winterlichen Zwischenphasen steigt. Für die temperaturempfindlichen Tiere und Pflanzen im See ist vor allem die maximale Wassertemperatur entscheidend. Auch sie steigt in all den Jahren von knapp 21 °C auf 22.5 °C. Dass die Wassertemperatur Ende Oktober nicht genau bei 4 °C liegt, was sie aufgrund des geschlossenen Kreislaufs müsste, wenn das Modell ganz exakt ist, zeigt, dass das Modell einige grössere Unsicherheitsfaktoren wie zum Beispiel die Dicke der Schichtungen oder die Wassertemperatur zu Beginn aufweist. Darauf wurde jedoch in den Randbedingungen hingewiesen.

Eisverlauf

Wie anfangs des Kapitels bereits beschrieben, unterscheiden sich die beiden Simulationen hierbei beträchtlich. Bei der Simulation mit Niederschlag ist vor allem entscheidend, wie lange die Zeitperiode Anfang Winter mit negativer Bilanz ohne Niederschlag ist. Fällt sie lang aus, so bildet sich rasch eine dicke Eisschicht, die stagniert und lange erhalten bleibt, sobald Schnee, der als totaler Isolator angenommen wird, darauf fällt. Sobald Schnee auf dem Eis liegt, gibt es jedoch keine Möglichkeit mehr, dass das Eis wächst, da unterirdisch keine negativen Wärmeströme aus dem System fliessen. In der Realität ist es möglich, dass sie ganz langsam wächst, da Wärme in geringer Menge auch durch Schnee fliessen kann. In der Simulation ohne Niederschlag spielt der Schnee als Isolator keine Rolle, da ja gemäss den Randbedingungen keiner fällt. Es kommt der ganze positive oder negative Wärmefluss bei der Eisschicht an und beeinflusst diese direkt. Die Eisschicht kann während des

gesamten Winters ungehindert wachsen oder schwinden. Die Eisdicken in der Simulation ohne Niederschlag werden im Verlaufe der Jahre immer geringer. Dass dies bei der Simulation mit Niederschlag genau gegenteilig verläuft sagt einzig aus, dass die Zeitperioden Anfang Winter mit negativem Wärmefluss und ohne Niederschlag gegen Mitte und Ende des Jahrhunderts länger werden und die Eisschicht dadurch besser wächst. Der Schnee, der danach darauf fällt schützt diese Eisschicht vor wärmeren Perioden und «konserviert» sie solange, bis der Schnee oben weggeschmolzen ist. Ob dies bei den Jahren 2060/2061 und 2098/2099 zufällig ist oder den allgemeinen Trend bzgl. Niederschlägen Anfang Winter aufzeigt, bleibt unklar.

Bei Betrachtung des klimatischen Trends fällt auf, dass die Bildung von Eis im Verlaufe der Jahre nicht unbedingt später beginnt, jedoch wächst die Schicht viel schwächer und kann durch warme Zwischenperioden wie im Jahr 2030/2031 noch einmal komplett wegschmelzen. Die maximale Eisdicke sinkt im Verlaufe der Jahre deutlich (massgebend ist die Simulation «ohne Niederschlag»). So beträgt die erwartete Maximaldicke im ersten Drittel des 21. Jahrhunderts zwischen 5 und 50cm, während im Jahre 2060/2061 maximal 6-10cm zu erwarten sind, was sicherlich nicht mehr für eine Begehung reicht. Auch zeigt der Trend, dass das Eis in Zukunft früher schmelzen wird und der See damit früher eisfrei wird.

Schneeverlauf

Die maximalen Schneedicken scheinen auf den ersten Blick recht hoch, dies kommt aber davon, dass in der Simulation gem. Randbedingung angenommen wird, dass 1 mm Niederschlag einer Schneedecke von 10 mm entspricht (mit einer Dichte von 100 kg/m^3). Diese addiert sich danach fortlaufend ohne sich zu komprimieren. In der Realität verdichtet sich der Schnee unten und die Schneedicke wird wesentlich kleiner. Nasser Schnee kann schnell eine Dichte von 500 kg/m^3 erreichen, womit eine Schneedicke von 10 mm am Anfang schnell auf 2 mm sinken kann. Es ist ersichtlich, dass die Eisschicht extrem schnell schmilzt und verschwindet, sobald der Schnee darauf weggeschmolzen ist. Dies zeigen auch warme Zwischenphasen im Winter, wo die Eisdecke auch mal komplett schmilzt und die Wassertemperatur danach kurz erhöht wird. Der Schnee sorgt deshalb dafür, dass das Eis überhaupt viel länger erhalten bleibt (teilweise bis Ende April). Ohne Schnee ist die Eisdecke im Durchschnitt bereits 50-60 Tage vorher (Ende Februar bis Mitte März) verschwunden.

4.4 Nährstoffe

Über den Nährstoffgehalt des Obersees ist grundsätzlich nichts bekannt. Allgemein ist es jedoch so, dass Algen im Epilimnion (Oberfläche) CO_2 und Nährstoffe aus dem Wasser aufnehmen und mit Hilfe des Sonnenlichts Algenbiomasse aufbauen. Gleichzeitig geben sie Sauerstoff ab. Der Prozess nennt sich Photosynthese. Die Sprungschicht sorgt jedoch dafür, dass gelöste Stoffe wie Sauerstoff oder Nährstoffe nicht ins Hypolimnion (Tiefenwasser) gelangen können. Dies führt dazu, dass die Sauerstoffkonzentration im Hypolimnion wesentlich tiefer als im Epilimnion ist und die Nährstoffkonzentration sehr gross. Zur gleichen Zeit wird der Sauerstoff im Hypolimnion benötigt, um abgesunkene, organische Materialien, die sich am Seegrund sammeln, zu zersetzen. Dies verdeutlicht die folgende Abbildung:

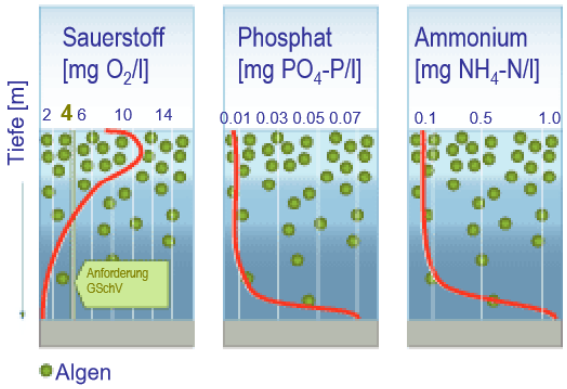


Abbildung 17: Sauerstoff- und Nährstoffkonzentration im See in Abhängigkeit der Tiefe [AWEL, 2019]

4.5 Klimatischer Trend

Der technische Bericht des CH2018-Modells zeigt auf, dass es im Jahr 2060 gegenüber dem Referenzzeitraum von 1981-2010 in der Schweiz vermehrt zu trockenen Sommer, heftigen Niederschlägen, mehr Hitzetagen und zu schneearmen Wintern kommt. Die Temperatur im Winter steigt. Sowohl beim Szenario RCP2.6 (konsequenter Klimaschutz), als auch dem Szenario RCP8.5 (kein Klimaschutz), steigen die Temperaturen. Dies zeigen die folgenden Grafiken, die aus dem CH2018-Modell berechnet wurden.

Ohne Klimaschutz (RCP8.5):

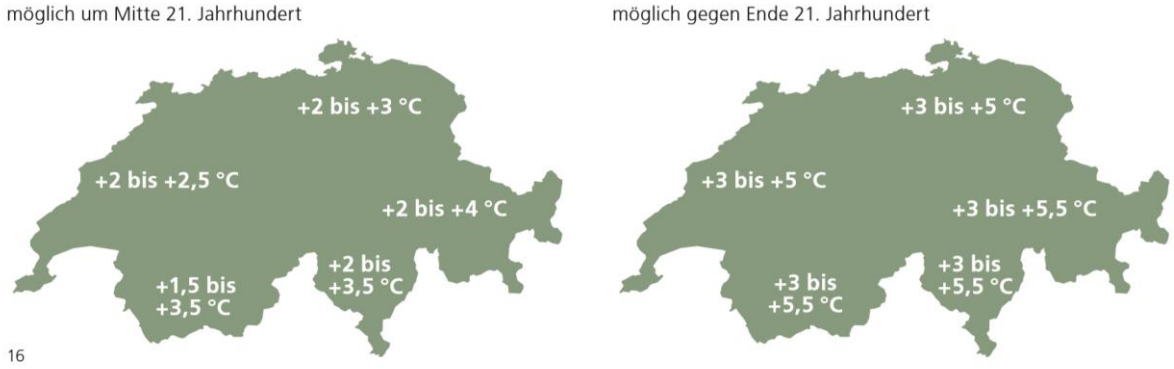


Abbildung 18: Änderung der durchschnittlichen, winterlichen Lufttemperatur gegenüber der Referenzperiode von 1981-2010 ohne Klimaschutz. (Quelle: Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz)

Mit Klimaschutz (RCP2.6):

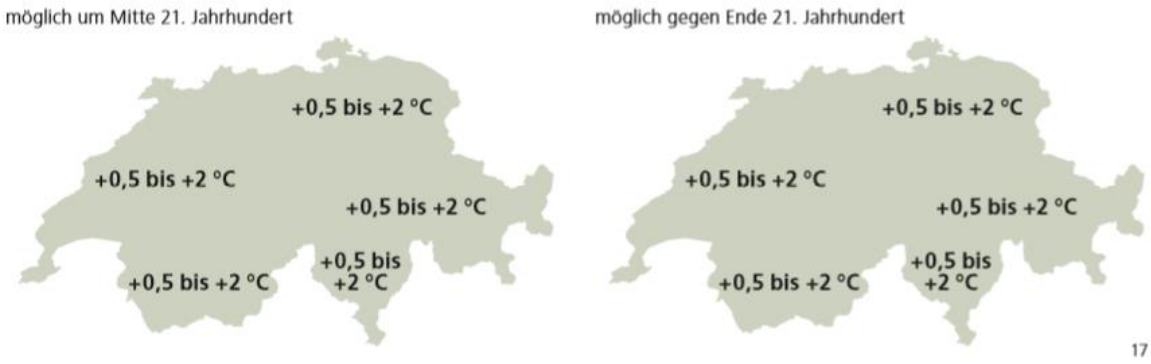


Abbildung 19: Änderung der durchschnittlichen, winterlichen Lufttemperatur gegenüber der Referenzperiode von 1981-2010 mit Klimaschutz. (Quelle: Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz)

Spezifisch für den Ort Arosa sind die durchschnittlichen, prognostizierten Wintertemperaturen (Zeitraum vom 01. November bis 31. März) ausgewählter Jahre in der folgenden Grafik zu sehen.

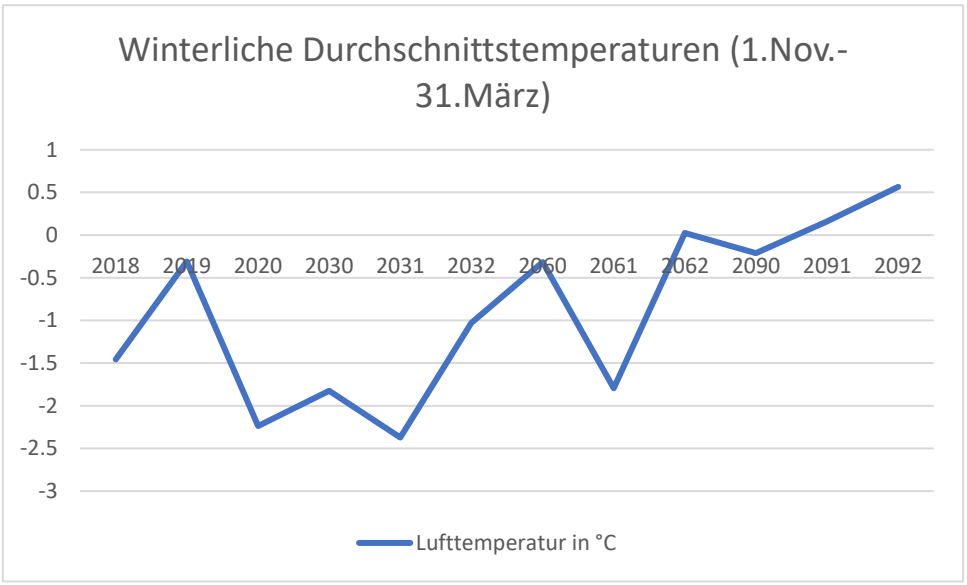


Abbildung 20: Winterliche Durchschnittstemperaturen für den Ort Arosa aus dem CH2018-Modell

Auch in dieser Grafik sind die steigenden Lufttemperaturen deutlich zu erkennen. Die ändernden klimatischen Bedingungen führen dazu, dass der Obersee in Arosa in Zukunft immer weniger «dick» gefrieren wird oder es vermehrt Winter geben kann, in welchen er gar nicht mehr gefriert. Die Auswirkungen auf Wassertemperatur und Eisschicht wurden bereits im Kapitel 4.3 in den Simulationen mit den CH2018-Modell-Daten gezeigt.

5. Rechtliche Grundlagen

Die thermische Nutzung von Gewässern in der Schweiz ist gesetzlich reguliert. Es besteht eine Gewässerschutzverordnung (GSchV), die Anforderungen an die Temperatur der Gewässer formuliert. Die folgenden Auszüge wurden weitgehend von [Gaudard, 2016] übernommen. Ein Punkt in der Gewässerschutzverordnung ist, dass die Schichtung und die Temperaturen in den genutzten, natürlichen Gewässern im Vergleich zum natürlichen Zustand nur geringfügig geändert werden dürfen:

Anhang 1 GSchV, **1 Ökologische Ziele für Gewässer / Oberirdische Gewässer, Absatz 3**

Die Wasserqualität soll so beschaffen sein, dass: a. die Temperaturverhältnisse naturnah sind.

Folgender Artikel beschränkt die Temperaturänderung und die maximale Temperatur eines Fliessgewässers in Folge eines technischen Eingriffs:

Anhang 2[90] GSchV, **12 Zusätzliche Anforderungen an Fliessgewässer, Absatz 4**

Die Temperatur eines Fliessgewässers darf durch Wärmeeintrag oder –entzug gegenüber dem möglichst unbeeinflussten Zustand um höchstens 3 °C, in Gewässerabschnitten der Forellenregion um höchstens 1,5 °C, verändert werden; dabei darf die Wassertemperatur 25 °C nicht übersteigen. Diese Anforderungen gelten nach weitgehender Durchmischung.

Entsprechende spezifische Anforderungen für stehende Gewässer beschränken ebenfalls die Temperaturänderungen, auch wenn diese Anforderungen an die Eingriffe nicht numerisch formuliert sind:

Anhang 2[90] GSchV, **13 Zusätzliche Anforderungen an stehende Gewässer, Absatz 3**

Für Seen gilt ausserdem:

a. *Durch Seeregulierungen, Wassereinleitungen und -entnahmen, Kühlwassernutzung und Wärmeentzug dürfen im Gewässer die natürlichen Temperaturverhältnisse, die Nährstoffverteilung sowie, insbesondere im Uferbereich, die Lebens- und Fortpflanzungsbedingungen für die Organismen nicht nachteilig verändert werden.*

Damit ist ersichtlich, dass im Gegensatz zu den Fliessgewässern keine numerisch exakt definierte, maximal erlaubte Temperaturveränderung für stehende Gewässer besteht. Die Eawag hat in einem Bericht diesen Abschnitt so interpretiert, dass die Wassertemperatur in einem See an keinem Ort und zu keiner Zeit um mehr als 1 °C verändert werden sollte. Davon ausgenommen ist die unmittelbare Einleitstelle, wo lokal aus praktischen Gründen höhere Temperaturabweichungen zugelassen werden dürfen. Für diesen Wert von 1 °C gibt es allerdings keine fundierte wissenschaftliche Grundlage.

Diese Arbeit behandelt jedoch einen Bereich der thermischen Energienutzung, den es gemäss Recherche noch nirgends gibt. Normale Wärmeentzüge bzw. thermische Energienutzungen von Seen und Fliessgewässern sind im Bereich der sensiblen Wärme, während diese Arbeit auch eine latente Wärmenutzung in Betracht zieht. Ob und in welchem

Umfang dies schlussendlich rein gesetzlich realisierbar ist, muss vor einer allfälligen Projektumsetzung sicherlich mit der zuständigen Behörde und Fachpersonen (z.B. Biologen) geklärt werden. Gegebenenfalls ist auch eine praktische Studie dafür nötig, die den Einfluss eines solchen technischen Projekts auf die Natur über eine längere Zeitperiode beobachtet.

6. Thermische Nutzung

Die Grundidee der thermischen Nutzung ist ganz einfach. Um Gebäude, Hallenbäder und andere Infrastrukturen im Winterhalbjahr zu heizen, wird dem Obersee Wärme «entnommen». Dabei kühlt sich der See ab und kann bei genügend grossem Wärmeentzug sogar gefrieren. Dies ist kein negativer Nebeneffekt, sondern ein gewünschter Zustand.

Der Wärmeentzug kann auf verschiedene Arten technisch realisiert werden und wird in den folgenden Kapiteln vom Gesamtkonzept hin zu möglichen Konzepten für die Teilsysteme beschrieben. Um zwischen dem Gesamtsystem und dessen Teilsysteme unterscheiden zu können, werden im Folgenden die Teilsysteme betrachtet. Es handelt sich einerseits um 3 Kreisläufe, die die Aufgabe haben, Wärme zu transportieren und auszutauschen. Anderseits handelt es sich um Wärmepumpenkreisläufe, sogenannte Kältemittelkreisläufe, die sowohl zentral als auch dezentral vorkommen können. Sie dienen dazu, die Temperatur zu heben.

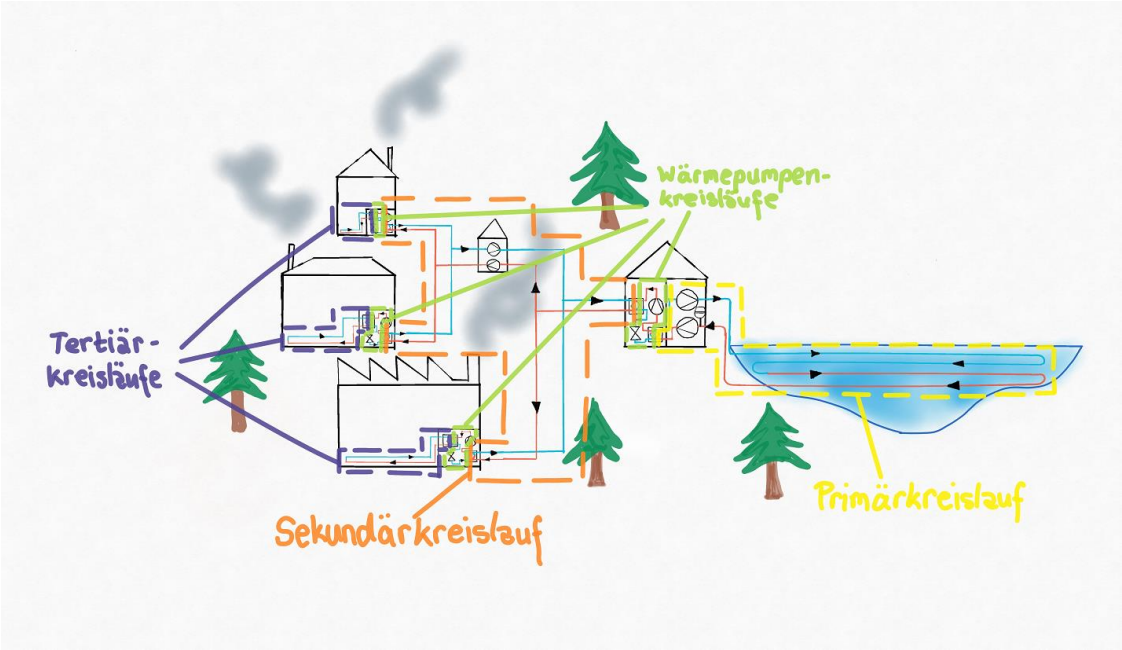


Abbildung 21: Übersicht der verschiedenen Teilsysteme

Es ist nicht zwingend, dass bei jedem Konzept bzw. jeder Auslegung alle Teilsysteme vorkommen. Sie sind teilweise integriert oder werden komplett weggelassen. Beispielsweise fällt der Sekundärkreislauf weg, wenn der Primärkreislauf direkt bis zum Wärmeverbraucher gezogen wird. Mehr dazu in den nachfolgenden Kapiteln.

Schwerpunkt liegt auf den möglichen Konzepten zur Umsetzung des Primärkreislaufes, sprich des Wärmeübergangs im See. Dies ist der Punkt, wo sich dieses Projekt von anderen thermischen Seewasser-Nutzungen unterscheidet und für den See relevant ist. Detailliertere Auslegungen für den Sekundärkreislauf, die Tertiärkreisläufe als auch die Wärmepumpen kann man dann machen, wenn klar ist, ob eine technische Umsetzung auf der Primärseite überhaupt realisierbar ist. Dafür existieren genügend Referenzprojekte und Erfahrungen mit anderen, ähnlichen Projekten. Im folgenden Kapitel wird jedoch zunächst auf die Fragestellung eingegangen, wie viel Wärme überhaupt aus dem Obersee «gewonnen» werden kann.

6.1 Wärmepotenzial

Um abschätzen zu können, welches Wärmepotenzial der Obersee hat, bzw. wie viel Wärme aus dem See «gewonnen» werden kann, muss abgeschätzt werden, wie dick die Oberflächenschicht $z_{Oben,Winter}$ ist, die nach der vollständigen Durchmischung und dem homogenen, vertikalen Temperaturverlauf bei 4 °C auf 0 °C abgekühlt werden muss. Im Falle des Obersees wird sie auf 2 m geschätzt, da dies in der natürlichen Simulation etwa nach 30 Tagen zur Eisbildung führt, was wiederum gemäss den Aufzeichnungen der Gemeinde ungefähr stimmt. Weiter muss definiert werden, wie dick die Eisschicht z_{Eis} werden darf/soll. Das Wärmepotenzial wird für drei verschiedene Eisdicken berechnet. Es sind Eisdicken von 0.5 m, 1 m und 2 m. Im Folgenden wird rechnerisch festgehalten, wie hoch diese Beträge überschlagsmässig sind.

Zuerst erfolgt eine Abkühlung von 4 °C auf 0 °C (sensible Wärme):

$$Q_{sens} = c_{p,W} * \rho_W * A_{See} * z_{Oben,Winter} * \Delta T = \frac{4190\,J}{kg * K} * 997\,\frac{kg}{m^3} * 81900\,m^2 * 2\,m * 4\,K$$
$$= 2.737 * 10^{11}\,J = 0.2737\,TJ$$

Danach erfolgt eine Abkühlung mit Phasenwechsel (latente Wärme):

- Für $z_{Eis} = 0.5\,m$:

$$Q_{lat} = h_{s,W} * \rho_E * A_{See} * z_{Eis} = \frac{334000\,J}{kg} * 900\frac{kg}{m^3} * 81900\,m^2 * 0.5\,m = 1.231 * 10^{13} J$$
$$= 12.31\,TJ$$

- Für $z_{Eis} = 1\,m$:

$$Q_{lat} = h_{s,W} * \rho_E * A_{See} * z_{Eis} = \frac{334000\,J}{kg} * 900\frac{kg}{m^3} * 81900\,m^2 * 1\,m = 2.462 * 10^{13} J$$
$$= 24.62\,TJ$$

- Für $z_{Eis} = 2\,m$:

$$Q_{lat} = h_{s,W} * \rho_E * A_{See} * z_{Eis} = \frac{334000\,J}{kg} * 900\frac{kg}{m^3} * 81900\,m^2 * 2\,m = 4.924 * 10^{13} J$$
$$= 49.24\,TJ$$

Diese Resultate zeigen bereits, welches Potenzial im Phasenwechsel liegt. Nur schon die Bildung von 0.5 m Eis benötigt einen Wärmeentzug, der rund 45-mal höher ist, als jener zur Abkühlung von einer 2 m dicken Oberflächenschicht von 4 °C auf 0 °C. Um dies nun in einen Wärmestrom (quasi eine Leistung) umzuwandeln, bedarf es der Definition eines Zeitraums, innerhalb welchem ein Zustand erreicht werden muss. Beispielhaft werden dafür folgende Rechnungen durchgeführt:

- Für $\Delta t = 45\,Tage$ (z.B. bis 15. Dezember 0.5 m Eis)

$$\dot{Q} = \frac{(Q_{lat} + Q_{sens})}{\Delta t} = \frac{(2.737 * 10^{11} + 1.231 * 10^{13})\,J}{45 * 24 * 3600\,s} = 3.236\,MW$$

- Für $\Delta t = 31\ Tage$ (z.B. 15.12.-15.01. zusätzlich 0.5 m Eis)

$$\dot{Q} = \frac{Q_{lat}}{\Delta t} = \frac{1.231 * 10^{13}\ J}{31 * 24 * 3600\ s} = 4.596\ MW$$

Mit diesen überschlagsmässigen Rechnungen ist also eine Leistung von bis knapp 5 MW möglich. Die Natur trägt hierbei aber wesentlich bei. Das bedeutet, dass man maximal die Differenz zwischen benötigtem und natürlichem Wärmestrom entziehen darf.

$$\dot{Q}_{techn} = \dot{Q}_{nötig} - \dot{Q}_{nat}$$

Das Bilanztotal des Sees ist eine dynamische Grösse, sie ändert sich ständig. Durch die täglich erfassten Durchschnitte des CH2018-Modells kann jeweils das Bilanztotal eines Tages erfasst werden. Um eine Grössenordnung für ein durchschnittliches, monatliches Bilanztotal zu haben in der Folge zwei Beispiele. Im November 2018 liegt das durchschnittliche Bilanztotal bei -18.1 W/m^2, was multipliziert mit der Fläche eine Leistung von $\dot{Q}_{nat} = -1.48\ MW$ ist. Im Dezember 2018 beträgt das Bilanztotal -56.3 W/m^2, was über die Fläche einer Leistung von $\dot{Q}_{nat} = -4.61\ MW$ entspricht. Daraus wird deutlich, dass der See die oben definierten Beispiele teilweise bereits selber erreichen kann. Technisch ist ungefähr maximal $\dot{Q}_{techn} = 1.7\ MW$ nützbar und diese Leistung muss zwingend regulierbar sein, da der See sonst bei einer sehr kalten Periode schneller und mehr gefriert, als gewünscht. In der Simulation wird dann verdeutlicht, was ein fixer, nicht regulierter, technischer Wärmestrom für einen Einfluss auf die Wassertemperatur und die Eisbildung hat. Dies wird anhand mehrerer verschiedener technischen Wärmeströme geprüft. Für die neue, technische Bilanz des Sees ist nun festzuhalten:

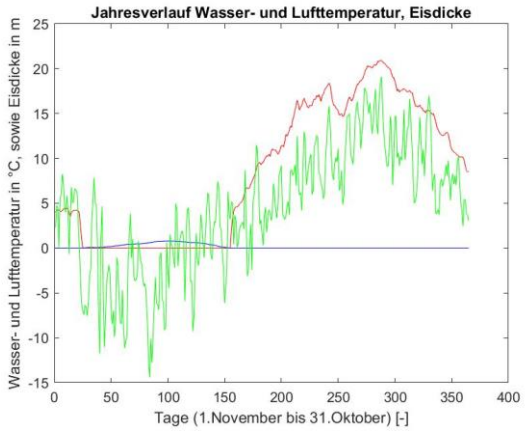
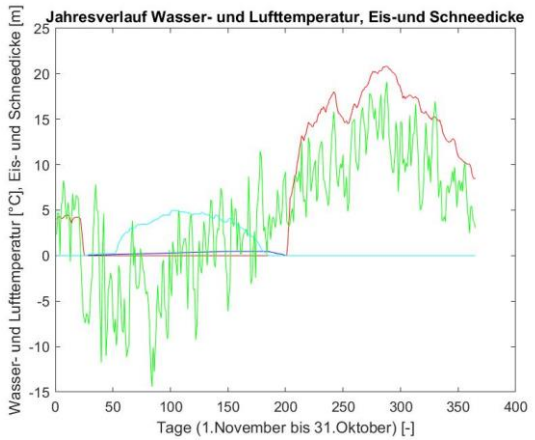
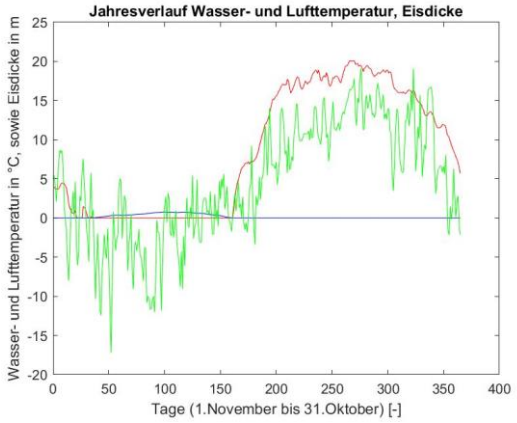
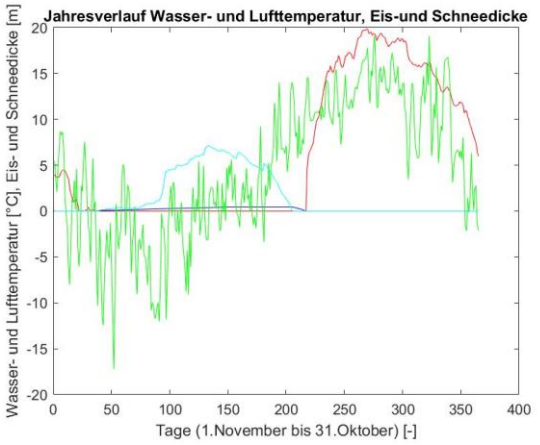
$$\sum \dot{Q}_{SB} + \dot{Q}_K + \dot{Q}_V + \dot{H}_{pr} + \dot{Q}_{techn} = c_{p,W} * \rho_W * \frac{d(z * T_W)}{dt} + h_{s,W} * \rho_E * \frac{dz}{dt}$$

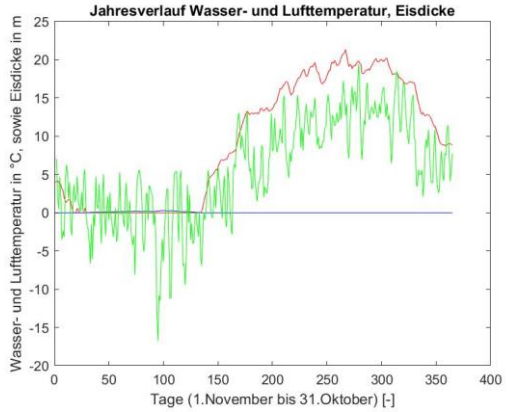
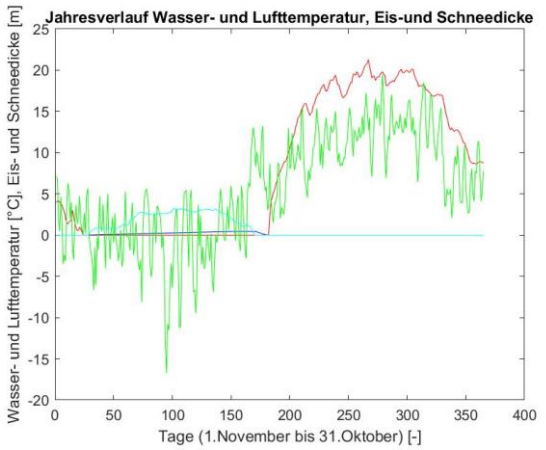
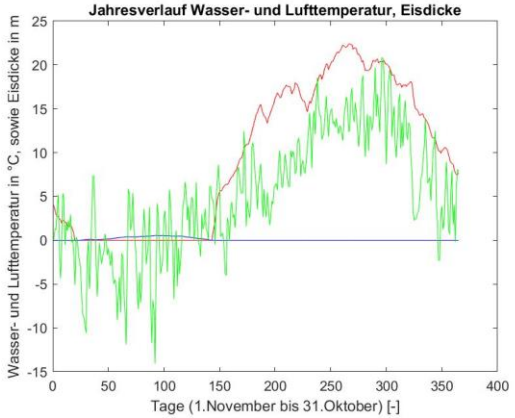
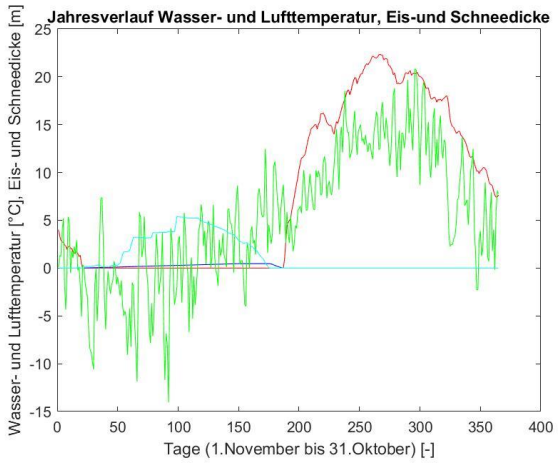
6.1.1 Simulation des Wärmepotenzials

Die Simulation soll prüfen, welchen Einfluss ein konstanter, technischer Wärmeentzug in verschiedenen Höhen auf das System hat. Fragen wie «Wie dick wird die Eisschicht?», «Wann beginnt die Eisbildung?» und «Wann ist die gesamte Eisschicht weggeschmolzen?» sollen beantwortet werden. Die Simulation wird wie bereits im Kapitel 4 beschrieben, auf zwei Arten durchgeführt und besitzt dieselben Randbedingungen. Einzig wird hierbei ein technischer Wärmeentzug hinzugefügt, der von Anfang November bis Ende März dem See zusätzlich einen Wärmestrom entzieht. Dies erfolgt knapp unterhalb der Oberfläche, im Bereich der oberen Schicht und der Eisbildungszone. Die zwei Simulationen «mit Niederschlag» und «ohne Niederschlag» werden mit zwei unterschiedlich hohen, technischen Wärmeströmen simuliert.

Zunächst wird eine technische Nutzung von 1 MW diskutiert, danach eine von 5 MW.

Thermische Nutzung: 1 MW

	Ohne Niederschlag		Mit Niederschlag	
2018/2019		**Beginn Eisbildung:** 26 Tage **Max. Eisdicke:** 0.79 m **Eis geschmolzen:** 154 Tage **Max. Wassertemp.:** 20.91 °C		**Beginn Eisbildung:** 27 Tage **Max. Eisdicke:** 0.47 m **Eis geschmolzen:** 200 Tage **Max. Schneedicke:** 4.98 m **Max. Wassertemp.:** 20.8 °C
2030/2031		**Beginn Eisbildung:** 23 Tage **Max. Eisdicke:** 0.76m **Eis geschmolzen:** 160 Tage **Max. Wassertemp.:** 20.1 °C		**Beginn Eisbildung:** 23 Tage **Max. Eisdicke:** 0.43 m **Eis geschmolzen:** 216 Tage **Max. Schneedicke:** 7.13 m **Max. Wassertemp.:** 19.84 °C

2060/2061		**Beginn Eisbildung:** 31 Tage **Max. Eisdicke:** 0.28m **Eis geschmolzen:** 133 Tage **Max. Wassertemp.:** 21.4 °C		**Beginn Eisbildung:** 26 Tage **Max. Eisdicke:** 0.43 m **Eis geschmolzen:** 181 Tage **Max. Schneedicke:** 3.23 m **Max. Wassertemp.:** 21.3 °C
2098/2099		**Beginn Eisbildung:** 21 Tage **Max. Eisdicke:** 0.54 m **Eis geschmolzen:** 142 Tage **Max. Wassertemp.:** 22.4 °C		**Beginn Eisbildung:** 22 Tage **Max. Eisdicke:** 0.462 m **Eis geschmolzen:** 186 Tage **Max. Schneedicke:** 5.4 m **Max. Wassertemp.:** 22.36 °C

Im Folgenden wird auf die für die thermische Nutzung relevanten Parameter eingegangen.

Wassertemperatur

Das Wasser kühlt sich zu Beginn des Winters durch die thermische Nutzung etwas schneller als normal ab, sodass 0 °C früher erreicht wird. Gemäss der Simulation «ohne Niederschlag» handelt es sich um einzelne Tage, bei der Simulation «mit Niederschlag» erreicht der See diesen Zustand ca. 1-2 Wochen früher (Ende November). Auf die maximale Wassertemperatur im Sommer scheint die thermische Nutzung keinen Einfluss zu haben, denn sie bleibt gegenüber dem natürlichen Zustand in beiden Simulationen praktisch unverändert.

Eisverlauf

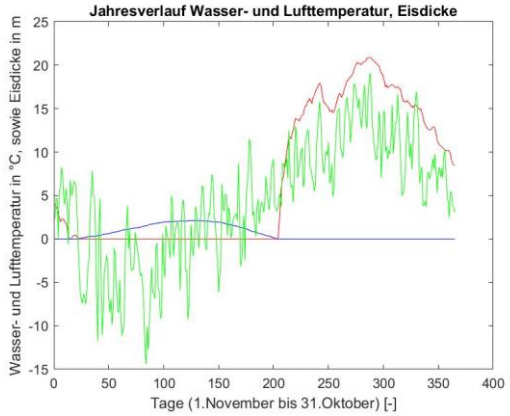
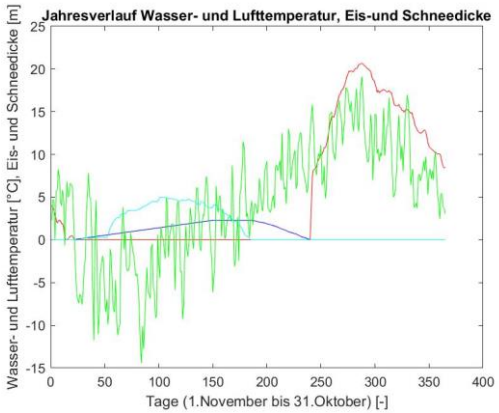
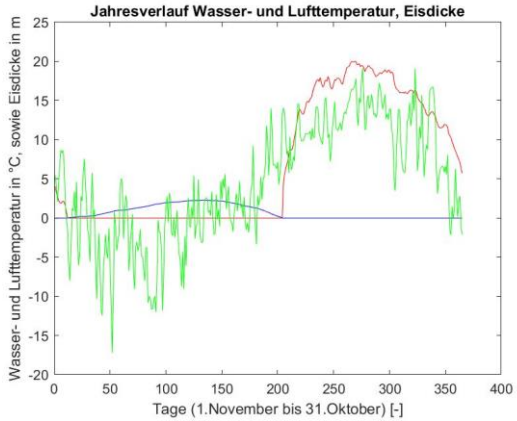
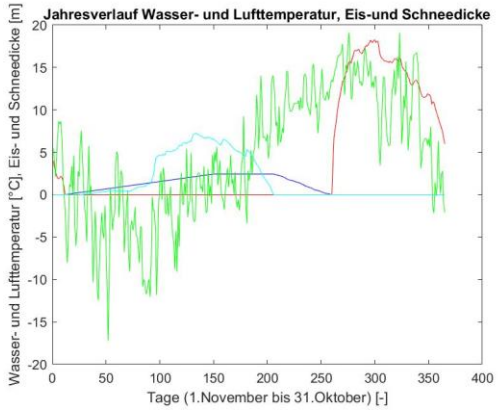
Wie bei der Wassertemperatur bereits erwähnt, erreicht der See die 0 °C-Grenze etwas früher bei der thermischen Nutzung im Vergleich zum natürlichen Zustand. Dies führt zu einer früheren Eisbildung. Es ist ersichtlich, dass die Eisdecke nun auch unter der Schneedecke wächst. Sobald die thermische Nutzung Ende März abrupt aufhört, beginnt sie zu schmelzen, insofern keine Schneedecke darauf liegt. Andernfalls stagniert die Eisdicke Ende März solange, bis der Schnee, welcher als totaler Isolator ein Schmelzen verhindert, komplett geschmolzen ist. Erst dann beginnt die Eisschmelze. Gegenüber dem natürlichen Verlauf ist das Eis 2-3 Wochen länger erhalten und schmilzt damit ca. Mitte Mai (ca. 200 Tage) komplett.

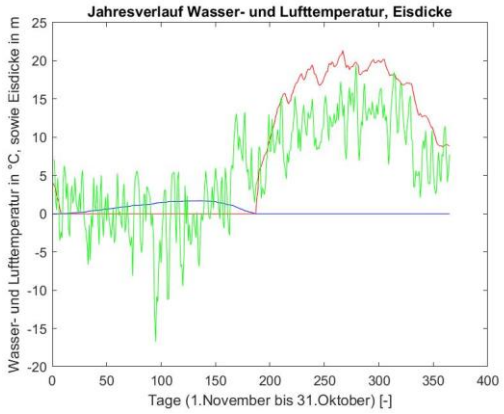
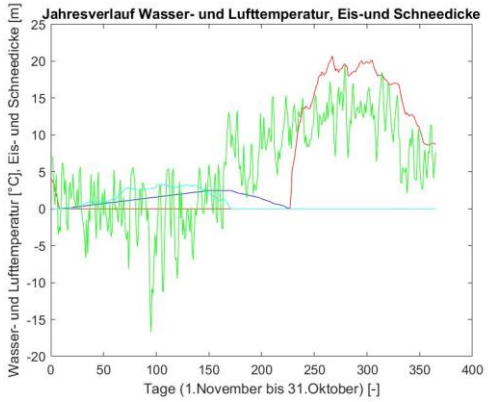
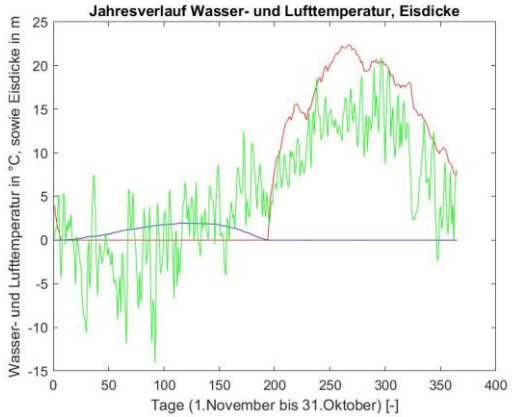
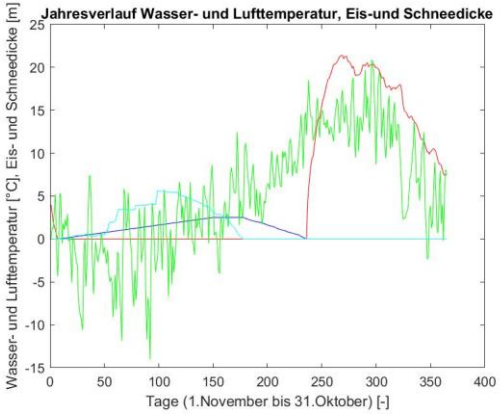
Die maximale Eisdicke ist über alle Jahre hinweg bei der Simulation «ohne Niederschlag» 0.2-0.25 m höher als im natürlichen Zustand. Bei der Simulation «mit Niederschlag» wird die maximale Eisdicke 0.3-0.4 m höher gegenüber dem natürlichen Zustand. Die reale, zusätzliche Eisdecke ist deshalb zwischen 0.2-0.4 m zu erwarten.

Schneeverlauf

Auf die Schneedecke hat die thermische Energienutzung kaum Einfluss. Einzig bildet sich etwas früher Eis, sodass sich etwas früher Schnee ansammeln kann und dies damit in einer gering höheren Schneedecke resultiert.

Thermische Nutzung: 5 MW

	Ohne Niederschlag		Mit Niederschlag	
2018/2019		**Beginn Eisbildung:** 23 Tage **Max. Eisdicke:** 2.12 m **Eis geschmolzen:** 203 Tage **Max. Wassertemp.:** 20.9 °C		**Beginn Eisbildung:** 23 Tage **Max. Eisdicke:** 2.29 m **Eis geschmolzen:** 239 Tage **Max. Schneedicke:** 5 m **Max. Wassertemp.:** 20.67 °C
2030/2031		**Beginn Eisbildung:** 13 Tage **Max. Eisdicke:** 2.26 m **Eis geschmolzen:** 203 Tage **Max. Wassertemp.:** 20.02°C		**Beginn Eisbildung:** 13 Tage **Max. Eisdicke:** 2.43 m **Eis geschmolzen:** 259 Tage **Max. Schneedicke:** 7.26 m **Max. Wassertemp.:** 18.25 °C

2060/2061		**Beginn Eisbildung:** 10 Tage **Max. Eisdicke:** 1.7 m **Eis geschmolzen:** 186 Tage **Max. Wassertemp.:** 21.34 °C		**Beginn Eisbildung:** 10 Tage **Max. Eisdicke:** 2.47 m **Eis geschmolzen:** 226 Tage **Max. Schneedicke:** 3.3 m **Max. Wassertemp.:** 20.7 °C
2098/2099		**Beginn Eisbildung:** 8 Tage **Max. Eisdicke:** 1.95 m **Eis geschmolzen:** 193 Tage **Max. Wassertemp.:** 22.38 °C		**Beginn Eisbildung:** 8 Tage **Max. Eisdicke:** 2.5 m **Eis geschmolzen:** 235 Tage **Max. Schneedicke:** 5.63 m **Max. Wassertemp.:** 21.4 °C

Im Folgenden wird auf die für die thermische Nutzung relevanten Parameter eingegangen.

Wassertemperatur

Ähnlich wie bei der 1 MW-Nutzung zeigt sich, dass sich das Wasser zu Beginn des Winters durch die thermische Nutzung schneller als normal abkühlt, sodass 0 °C früher erreicht wird. Bei günstigen Bedingungen wird die 0 °C-Grenze bereits innerhalb weniger als 10 Tagen erreicht. Auf die maximale Wassertemperatur im Sommer scheint auch eine thermische Nutzung von 5 MW keinen Einfluss zu haben, denn sie bleibt gegenüber dem natürlichen Zustand in beiden Simulationen praktisch unverändert. Im Gegensatz zur 1 MW-Nutzung fällt jedoch der sehr steile Anstieg der Wassertemperatur auf, der Beginnt, sobald das letzte Eis geschmolzen ist.

Eisverlauf

Wie bei der Wassertemperatur bereits erwähnt, erreicht der See die 0 °C-Grenze etwas früher bei der thermischen Nutzung im Vergleich zum natürlichen Zustand. Dies führt zu einer früheren Eisbildung. Die erwartete, maximale Eisbildung im Verlaufe der Zeit ist schwierig zu deuten, zeigt die Simulation «mit Niederschlag» nämlich erstmals eine dickere Eisschicht an als das Pendant ohne Niederschlag. Dies liegt daran, dass die Eisschicht unter der Schneedecke unter der Eisdecke unbehindert wachsen kann und ungestört von den Einflüssen ausserhalb der Schneedecke (z.B. wärmeren Zwischenperioden) ist. Dies entspricht nicht ganz der Realität. Dort würde sich eine solche Periode (oder ein Frühling mit positiver Bilanz) über längere Zeit sicherlich mit einem mindernden Eisaufbau bemerkbar machen. Zu erwarten ist jedoch ungefähr eine Eisdecke von 2-2.5 m Dicke. Normal sind zwischen 0.05 m und 0.5 m zu erwarten. Die Zusätzliche Eisschicht beträgt daher ungefähr 2 m. Gegenüber dem natürlichen und dem technischen 1 MW-Verlauf bleibt das Eis noch länger erhalten und schmilzt damit ca. Mitte bis Ende Juni komplett.

Schneeverlauf

Wie bei der 1 MW-Nutzung hat die thermische Energienutzung auf den Schneeverlauf kaum Einfluss. Das früher gebildete Eis führt einzig dazu, dass sich etwas mehr Schnee ansammelt, der im Vergleich zum selben Zeitpunkt beim natürlichen Verlauf im Wasser verschmelzen würde. Das führt zu einer gering höheren Schneedecke im Gegensatz zur 1 MW-Nutzung und dem natürlichen Verlauf.

6.2 Gesamtkonzept

Das Gesamtkonzept soll das Fernwärmenetz als Ganzes von der Wärmequelle bis und mit dem Wärmeverbraucher betrachten. Ein Fernwärmenetz ist definiert als eine Art der Wärmeversorgung, bei welcher zum Transport und zur Verteilung von Wärme öffentlicher Boden beansprucht wird und Wärme an Dritte verkauft wird.

Aufgrund des niederen Temperaturniveaus von ca. 0-4 °C der Wärmequelle (= der Obersee), spricht man auch von einem Anergienetz, insofern keine zentrale Hebung des Temperaturniveaus bis über 20 °C erfolgt. Dies hat den Vorteil, dass die Wärmeverluste geringer sind und der Einsatz an Exergie minimiert wird. Andererseits benötigen die

Verbraucher dann eine eigene Wärmepumpe, denn z.B. für die Heizung von Räumen sind erst Temperaturen ab 40 °C nutzbar.

Für die technische Umsetzung werden nun drei Möglichkeiten vorgestellt.

- **Konzept 1:** Zentrale Temperaturerhöhung

Bei diesem Konzept wird die Temperatur zentral auf das benötigte Niveau (ca. 35 °C) der Verbraucher erhöht. Das bedeutet, dass die Wärme aus dem Primärkreislauf an das Kältemittel einer oder mehrerer parallel geschalteter Wärmepumpen abgegeben wird, die zentral zwischen Wärmequelle und Wärmeverbraucher steht. Nach der Temperaturerhöhung wird die Wärme in einem Fernwärmenetz zu den Verbrauchern transportiert, die diese Wärme direkt nutzen können.

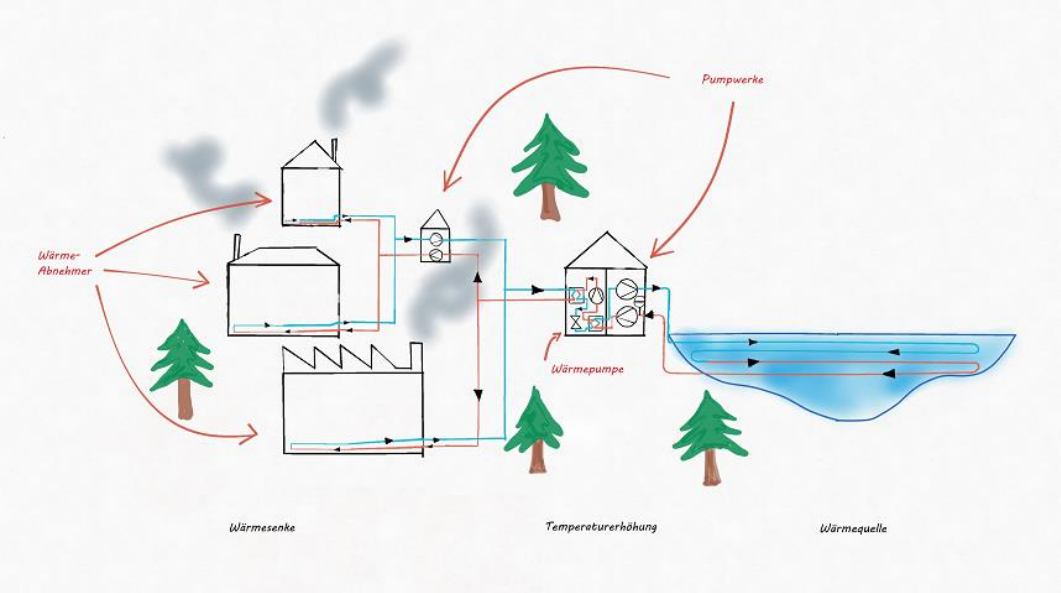


Abbildung 22: Zentrale Temperaturerhöhung

Vorteile	**Nachteile**
• Nutzer muss keine eigene Wärmepumpe bauen	• Das Temperaturniveau ist für alle ungefähr gleich. Keine individuellen Wünsche.
• Geringer Massenstrom im Fernwärmenetz	• Wärmeverlust durch den Transport
• Kein Gefrieren der Leitung	• Hohe Investitionskosten für den Betreiber des Fernwärmenetzes

- **Konzept 2:** Dezentrale Temperaturerhöhung

Bei diesem Konzept wird die Temperatur dezentral auf das individuell benötigte Niveau der Verbraucher erhöht. Das bedeutet, dass die Wärme aus dem Primärkreislauf an die Kältemittel der Wärmepumpen abgegeben wird, die direkt beim Verbraucher installiert sind.

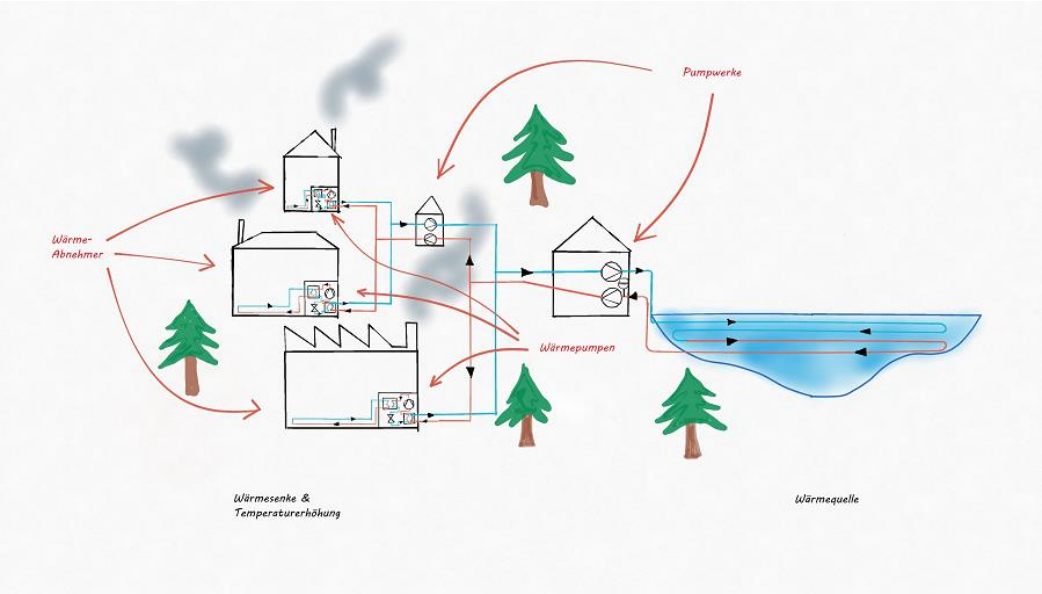


Abbildung 23: Dezentrale Temperaturerhöhung

Vorteile	**Nachteile**
• Der Verbraucher kann das benötigte Temperaturniveau selber festlegen	Der Verbraucher hat höhere Investitionskosten, da er selbst eine Wärmepumpe (mit dem nötigen Platz) benötigt
• Durch den unterirdischen Transport auf einem tiefen Temperaturniveau kann unterwegs sogar noch an Wärme durch die Umgebung gewonnen werden.	• Hoher Massenstrom aufgrund tiefem Temperaturniveau benötigt
	• Die Umgebung des (unterirdischen) Rohres kann vereisen
	• Bei geschlossenem Kreislauf wird sehr viel Sole benötigt. Das führt zu extrem hohen Kosten

- **Konzept 3:** Zentral/ Dezentral-gemischte Temperaturerhöhung

Dieses Konzept ist eine Mischung aus Konzept 1 und 2. Die Temperatur wird einerseits zentral auf ein höheres Niveau gehoben (z.B. 20 °C). Danach wird die Wärme in einem Fernwärmenetz zu den Verbrauchern transportiert. Die Verbraucher ihrerseits haben andererseits auch Wärmepumpen installiert, die den restlichen, benötigten Temperaturhub dezentral erledigen (z.B. 35 °C). Dies ist damit eine zweistufige Temperaturerhöhung. Die vorgängige Temperaturerhöhung sorgt dafür, dass gegenüber der Methode 2 ein wesentlich geringerer Massenstrom zu den Verbrauchern gefördert muss. Dies benötigt weniger elektrische Energie für den Antrieb der Pumpen.

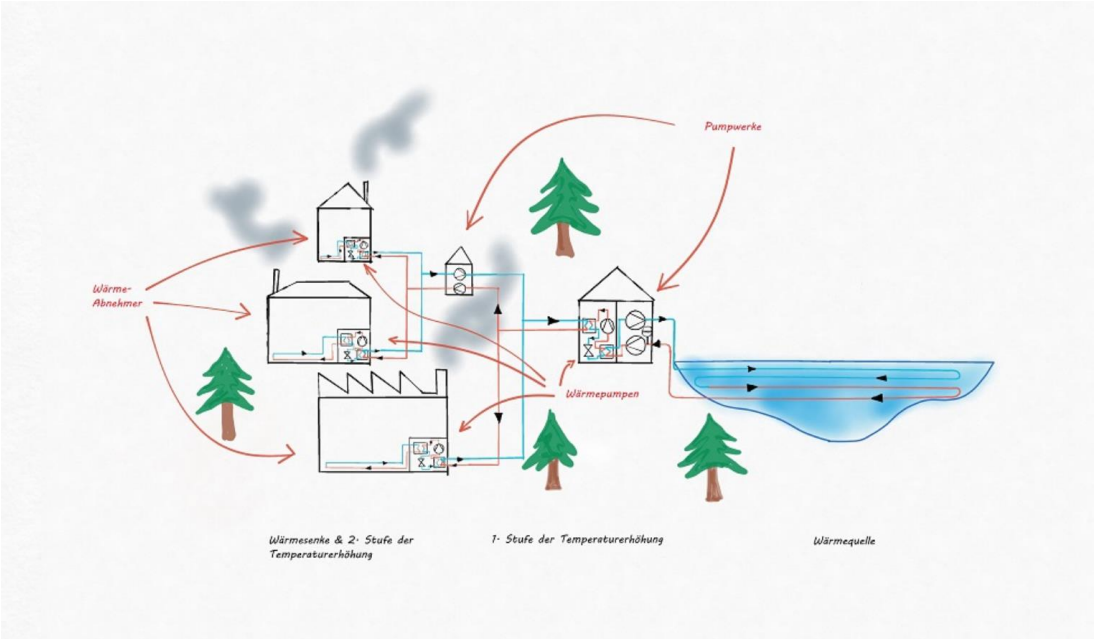


Abbildung 24: Zweistufige Temperaturerhöhung

Vorteile	**Nachteile**
• Der Verbraucher kann das benötigte Temperaturniveau selbst festlegen	• Der Verbraucher als auch der Betreiber des Fernwärmenetzen haben höhere Investitionskosten, da er selbst eine Wärmepumpe (mit dem nötigen Platz) benötigt
• Durch den unterirdischen Transport auf einem tiefen Temperaturniveau kann unterwegs sogar noch an Wärme durch die Umgebung gewonnen werden.	• Hoher Massenstrom benötigt
	• Wärmeverlust durch den Transport

6.3 Primärkreislauf

In diesem Kapitel wird darauf eingegangen, wie die technische Umsetzung des Primärkreislaufes aussehen könnte. Dabei wird unterschieden zwischen geschlossenem und offenem Kreislauf. Beim geschlossenen Kreislauf werden verschiedene Varianten aufgezeigt.

6.3.1 Geschlossener Kreislauf

Sole

Geschlossener Kreislauf bedeutet, dass die Wärme nicht direkt an die Wärmepumpe übertragen wird sondern indirekt über ein Wärmetransportmittel, der sogenannten Sole. Dabei handelt es sich um ein frostsicheres Wasser-Glykol-Gemisch, dessen Verhältnis sich

je nach gewünschtem Kälteschutz ergibt. Der Kälteschutz ist das arithmetische Mittel aus dem Eisflockenpunkt (ASTM D 1177) und dem Stockpunkt (DIN 51583). Der Eisflockenpunkt ist dabei die Temperatur, bei der sich beim Abkühlen die ersten Eiskristalle bilden. Dadurch entsteht Eisbrei, der keine Sprengwirkung besitzt. Bei weiterer Abkühlung bzw. Temperatursenkung wird der Eisbrei immer dicker, bis er am Stockpunkt erstarrt. Für die folgenden Berechnungen wird das Frostschutzmittel Tyfocor verwendet und zwar mit einer Konzentration von 60 Vol.-%. Dies ergibt einen Kälteschutz von <-50 °C, was mit genügend Sicherheit eine Berstgefahr der Anlage verhindert[1]. Da die Wärmekapazität mit zunehmender Konzentration sinkt, ist bei einer detaillierten Auslegung dieser Wert zu prüfen. Auch senkt dies die Kosten der Sole. Zur Vereinfachung werden für die Berechnungen die temperaturabhängigen Eigenschaften von Tyfocor als konstant angenommen (bei -10 °C). Folgende Angaben macht der Hersteller:

- Spezifische, isobare Wärmekapazität c_p: 3160 J/(kg*K)
- Dichte ρ: 1073 kg/m^3
- Kinematische Viskosität der Flüssigkeit v: 0.0000563 m^2/s
- Wärmeleitfähigkeitskoeffizient λ: 0.278 W/(K*m)

Die gewünschte Temperaturdifferenz zwischen Soleein- und austritt beträgt 8 K (Soleeintritt bei -8 °C, Soleaustritt bei 0 °C).

Im Folgenden werden zwei verschiedene Konzepte vorgestellt, auf welche Arten eine Wärmeübertragung mittels eines geschlossenen Kreislaufs ausgeführt werden kann. Dabei wird detailliert auf die Berechnung von Konzept 1 mit Rohren eingegangen. Konzept 2 mit Platten wird nur kurz beschrieben.

Konzept 1: Rohre

Dieses Konzept sieht die Wärmeübertragung über Rohre vor, die in der obersten Wasserschicht, knapp unterhalb der Oberfläche, montiert werden. Dabei sind verschiedene Anordnungen und Rohrdimensionen denkbar. Es werden verschiedene Varianten durchgerechnet und anhand ihrem Wärmedurchgang, bzw. der nötigen Rohrlänge und der aufzuwendenden hydraulischen Leistung verglichen. Das Wasser soll direkt um die Rohre gefrieren und damit eine stabile Eisschicht an der Oberfläche bilden. In der folgenden Abbildung ist ein Rohr zu sehen, welches eine initiale, wachsende Eisschicht aufweist.

[1] Je höher die Konzentration des Frostschutzmittels, desto höher die Kosten. Jedoch steigt auch die kinematische Viskosität mit steigender Konzentration stark. Dies führ zu erhöhten Strömungsdruckverlusten der Anlage und sinkenden Wärmeübergangskoeffizienten.

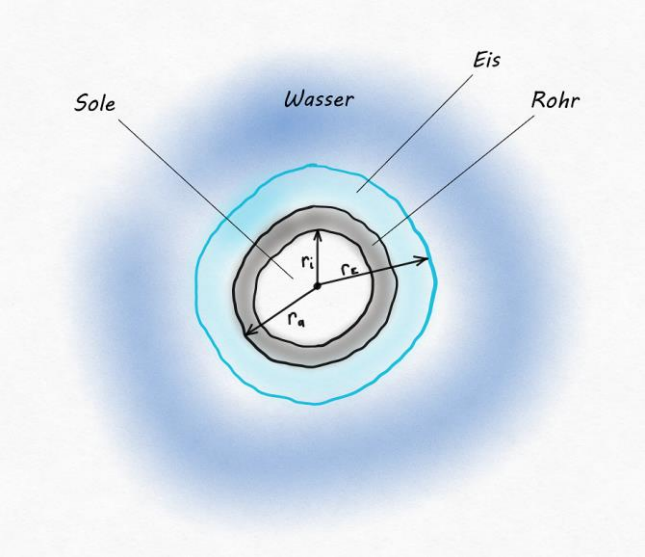


Abbildung 25: Axialansicht eines Rohres mit Eisschicht

Für die Auslegung der Rohre ist es wichtig, den angestrebten, primären Wärmestrom $\dot{Q}_{prim}$ zu kennen, der vom Wasser über die Eisschicht und die Rohrwand an die Sole fliessen soll. Dies wurde im Kapitel 6.1 als Wärmepotenzial berechnet und dient hierbei nun als Grundlage zur Abschätzung der Dimensionierung. Ziel ist es schlussendlich, die notwendige Fläche der wärmeübertragenden Rohre A und damit deren Länge zu kennen. Die folgende Gleichung zeigt die Zusammenhänge zwischen Wärmedurchgangskoeffizient k, der Rohrfläche A und der Temperaturdifferenz zwischen der Wassertemperatur T_W und Solentemperatur T_{Sole}:

$$\dot{Q}_{prim} = k * A * (T_W - T_{Sole})$$

Die Temperaturdifferenz zwischen Sole und Wasser beträgt 8 K. Das umliegende Wasser hat nämlich eine Temperatur von ungefähr 0 °C und die Solentemperatur liegt ungefähr bei der definierten Soleeintrittstemperatur -8 °C. Die Solentemperatur wird als konstant betrachtet, obwohl in der Realität mit zunehmender Aufenthaltszeit im Bereich des Wärmeübergangs eine Temperaturerhöhung zu erwarten ist. Ziel ist bekanntlich ein Angleich an die Temperatur des Wassers, bzw. Eises bei 0 °C, was in der Realität jedoch nicht erreicht werden dürfte. Unbekannt ist damit der Wärmedurchgangskoeffizient. Dieser beschreibt, wie gut der Wärmedurchgang durch eine Rohrwand und gegebenenfalls einer Eisschicht ist. Sobald sich eine Eisschicht um das Rohr gebildet hat, verschlechtert sich der Wärmedurchgang durch den zusätzlichen Widerstand stark. Bei Rohren führt der radiale Zuwachs der Eisschicht jedoch gleichzeitig auch zu einer Vergrösserung der Fläche, was den Wärmestrom vergrössert. Dies wirkt dem schlechteren Wärmedurchgang deshalb entgegen. Der Wärmedurchgangskoeffizient hängt bereits von der Dimension der Rohre ab, weshalb in einer ersten Iteration bereits beliebige Rohrquerschnitte angenommen werden müssen. Sind die genannten Faktoren berechnet, lässt sich anschliessend die Länge der Rohre und der Druckverlust der Strömung und damit die benötigte Pumpenleistung berechnen. In weiteren Iterationen werden danach die Rohrquerschnitte angepasst, um die

Vor- und Nachteile verschiedener Grössen bzgl. Wärmedurchgang und Druckverlust aufzuzeigen.

Berechnung Konzept 1

Die gesamte Berechnung erfolgt auf Basis von [VDI-Gesellschaft, 2013] und wurde mit Matlab durchgeführt. Das Programm ist im digitalen Anhang zu finden. Im Folgenden werden die Berechnungsschritte einzeln aufgezeigt.

Wärmedurchgangskoeffizient

Der Wärmedurchgangskoeffizient wird am Modell «Zweischichtige Zylinderwand» berechnet. Jede Schicht (Rohrwand und Eis) stellt damit einen Widerstand dar, die sich addieren. Es handelt sich dabei um einen auf die Rohrinnenwand bezogenen Wert[2].

$$k_{Eis} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{r_i}{\lambda_R} * \ln\frac{r_a}{r_i} + \frac{r_a}{\lambda_E} * \ln\frac{r_E}{r_a} + \frac{1}{\alpha_a}}$$

α_i: Wärmeübergangskoeffizient Innenströmung [W/(m²*K)]

α_a: Wärmeübergangskoeffizient Aussenströmung [W/(m²*K)]

r_i: Innenradius des Rohres [m]

r_a: Aussenradius des Rohres [m]

r_E: Aussenradius der Eisschicht [m]

λ_R: Wärmeleitfähigkeitskoeffizient der Rohrwand [W/(K*m)]

λ_E: Wärmeleitfähigkeitskoeffizient des Eises [W/(K*m)]

Wärmeübergangskoeffizient Rohr(-innen)strömung

Bei der Strömung der Sole im Rohr handelt es sich um erzwungene Konvektion. Für den Wärmeübergangskoeffizienten α_i gilt:

$$\alpha_i = \frac{Nu * \lambda}{L}$$

L: Charakteristische Länge [m]

Nu: Nusselt-Zahl [-]

[2] Gemäss dem Buch «Dynamische Simulation zur wirtschaftlichen Bewertung von komplexen Energiesystemen»

Die Nusselt-Zahl berechnet sich in Abhängigkeit, ob die Strömung laminar (Re <= 2300) oder turbulent (Re > 2300) ist. Für turbulent ausgebildete Rohrströmungen gilt für die Nusselt-Zahl Nu_T:

$$Nu_T = \frac{Re * Pr * \frac{\zeta}{8}}{1 + 12.7 * \sqrt{\frac{\zeta}{8}} * (Pr^{\frac{2}{3}} - 1)} * [1 + \left(\frac{d_i}{L}\right)^{\frac{2}{3}}]$$

Re: Reynoldszahl [-]

Pr: Prandtl-Zahl [-]

ζ: Beiwert [-]

d: Hydraulischer Durchmesser [m]

Dabei ist der Einfluss der charakteristischen Länge auf die Nusselt-Zahl sehr gering. Das ist gut, da diese noch unbekannt ist. Folgende Beispiele (mit $d_i = 0.05\ m$) zeigen dies auf:

Rohrlänge	**Längen-Beiwert**
100 m	$\left[1 + \left(\frac{d_i}{L}\right)^{\frac{2}{3}}\right] = \left[1 + \left(\frac{0.05}{100}\right)^{\frac{2}{3}}\right] = 1.0063$
1'000 m	$\left[1 + \left(\frac{0.05}{1000}\right)^{\frac{2}{3}}\right] = 1.0014$
10'000 m	$\left[1 + \left(\frac{0.05}{10000}\right)^{\frac{2}{3}}\right] = 1.00029$

Tabelle 4: Einfluss der Rohrlänge auf die Nusselt-Zahl bei turbulenter Strömung

mit

$$\zeta = (1.8 * \log_{10} Re - 1.5)^{-2}$$

mit

$$Re = \frac{v * d_i}{\nu} = \frac{\rho * v * L}{\eta}$$

d_i: Innendurchmesser des Rohrs [m]

v: Geschwindigkeit der Flüssigkeit [m/s]

v: Kinematische Viskosität der Flüssigkeit [m^2/s]

ρ: Dichte der Flüssigkeit [kg/m^3]

η: Dynamische Viskosität der Flüssigkeit [N*s/m^2]

mit

$$Pr = \frac{\eta * c_p}{\lambda}$$

c_p: spezifische, isobare Wärmekapazität der Flüssigkeit [J/(kg*K)]

λ: Wärmeleitfähigkeitskoeffizient [W/(K*m)]

mit

$$v = \frac{\dot{V}}{A}$$

A: Innenfläche des Rohrs [m^2]

mit

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{n * \rho}$$

n: Anzahl Rohre[3]

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}_{prim}}{c_p * \Delta T}$$

mit

$$\Delta T = T_{aus} - T_{ein}$$

T_{ein}: Soleneintrittstemperatur [K]

T_{aus}: Solenaustrittstemperatur [K]

Die meisten Strömungen sind turbulent. Für die Einzelfälle wird im Folgenden auf die laminare Strömung eingegangen. Die Nusselt-Zahl der laminaren Strömung Nu_l ändert sich im Verlauf zwischen Ein- und Austritt der Sole. Aufgrund dessen, dass sich die Laminarströmung bei gleichzeitigem thermischem und hydrodynamischem Anlauf schnell ausbildet, ist die Berechnung einer mittleren Nusselt-Zahl hinreichend genau. Grössere

[3] Die Anzahl Rohre hängt davon ab, wie viele Rohre parallel durchströmt werden sollen (und damit quasi eigene Kreisläufe darstellen).

Abweichungen wären bei kurzen Rohren vorhanden, dies ist bei dieser Auslegung jedoch nicht der Fall.

$$Nu_l = [{Nu_{m,1}}^3 + 0.6^3 + \left(Nu_{m,2} - 0.6\right)^3]^{\frac{1}{3}}$$

mit

$$Nu_{m,1} = 4.364$$

$$Nu_{m,2} = 1.953 * (Re * Pr * \frac{d_i}{L})$$

Im Gegensatz zu der turbulenten Strömung ist die Berechnung der mittleren, laminaren Nusselt-Zahl jedoch stark abhängig von der Rohrlänge. Dies wirkt sich auf den Wärmeübergangskoeffizienten aus. Folgende Berechnungen (mit $d_i = 0.05\ m$, $Re = 868$ und $Pr = 686$) verdeutlichen dies:

Rohrlänge	**Nusselt-Zahl**
100 m	$Nu_l = [{Nu_{m,1}}^3 + 0.6^3 + \left(Nu_{m,2} - 0.6\right)^3]^{\frac{1}{3}}$ $= [4.364^3 + 0.6^3 + \left(1.953 * (868 * 686 * \frac{0.05}{100}) - 0.6\right)^3]^{\frac{1}{3}}$ $= 580.86$
1’000 m	$Nu_l = [4.364^3 + 0.6^3 + \left(1.953 * (868 * 686 * \frac{0.05}{1000}) - 0.6\right)^3]^{\frac{1}{3}} = 57.55$
10'000 m	$Nu_l = [4.364^3 + 0.6^3 + \left(1.953 * (868 * 686 * \frac{0.05}{10000}) - 0.6\right)^3]^{\frac{1}{3}} = 6.08$

Tabelle 5: Einfluss der Rohrlänge auf die Nusselt-Zahl bei laminarer Strömung

Wärmeübergangskoeffizient Aussenströmung

Bei der Strömung ausserhalb des Rohres handelt es sich um freie Konvektion. Für den Wärmeübergangskoeffizienten α_a gilt wiederum:

$$\alpha_a = \frac{Nu * \lambda}{L}$$

mit

$$Nu = [0.752 + 0.387 * (Ra * f_3(\mathrm{Pr}))^{\frac{1}{6}}]^2$$

Ra: Raleigh-Zahl [-]

$f_3(\mathrm{Pr})$: Prandtl-Funktion [-]

mit

$$Ra = \frac{g * L^3 * \beta * (T_s - T_\infty) * Pr}{\nu^2}$$

g: Erdbeschleunigung [m/s^2]

L: Anströmlänge $L = \frac{\pi * d}{2}$ [m]

T_s: Oberflächentemperatur [K]

T_∞: Temperatur des umgebenen Wassers [K], $T_\infty = 4\,°C$

β: Temperatur-Beiwert

mit

$$\beta = \frac{1}{T_\infty}$$

$$f_3(\mathrm{Pr}) = \left[1 + \left(\frac{0.559}{Pr}\right)^{\frac{9}{16}}\right]^{\frac{-16}{9}}$$

Benötigte Fläche bzw. Rohrlänge

Hat man den Wärmedurchgangskoeffizienten berechnet, gelangt man zur ersten Gleichung zurück und formuliert diese um. In Anbetracht dessen, dass der Wärmedurchgangskoeffizient auf die Rohrinnenwand bezogen ist, gilt:

$$\dot{Q}_{prim} = k * A_i * (T_{Eis} - T_{Sole})$$

mit

$$A_i = 2 * \pi * r_i * L$$

ergibt

$$L = \frac{\dot{Q}_{prim}}{k * (T_{Eis} - T_{Sole}) * 2 * \pi * r_i}$$

Hydraulische Bilanz

Die nachfolgenden Berechnungen auf Grundlage von [Böswirth und Bschorer, 2014] mit Matlab durchgeführt. Auch dieses Programm ist im digitalen Anhang zu finden.

Um die notwendige Pumpenleistung zu ermitteln, die notwendig ist, um den definierten, primärseitigen Wärmestrom zur Wärmepumpe zu transportieren, ist es notwendig, die Druckverluste der Rohrströmung zu ermitteln. Im Rohrleitungsnetz gibt es einerseits kontinuierliche Strömungs-Druckverluste und andererseits lokale Strömungs-Druckverluste.

Kontinuierliche Druckverluste sind diejenigen, die in Folge der Fortbewegung der Flüssigkeit längs eines geradlinigen Rohrabschnittes durch Reibung (u.a. den Rohrwänden) entstehen. Lokale Druckverluste hingegen entstehen nur an bestimmten Stellen durch Einbauten wie Krümmer, Blenden, usw.

Zur Übersicht folgt Bernoulli-Gleichung, die mit einem Arbeits- und Verlustglied erweitert wurde:

$$\frac{p_1}{\rho} + g * z_1 + \frac{{v_1}^2}{2} + g * H_F = \frac{p_2}{\rho} + g * z_2 + \frac{{v_2}^2}{2} + e_v$$

p_1, p_2: Druckniveau 1 & 2 [N/m^2]

z_1, z_2: Höhe Niveau 1 & 2 [m]

v_1, v_2: Geschwindigkeit Niveau 1 & 2 [m/s]

H_F: Förderhöhe der Pumpe [m]

e_v: Druckverluste gesamt [m^2/s^2]

Druck, Höhe und Geschwindigkeit sind gemäss der Systemabgrenzung auf Niveau 1 & 2 genau gleich hoch. Sie fallen deshalb weg. Die Pumpe muss deshalb einzig die lokalen und kontinuierlichen Druckverluste kompensieren. Für die notwendige Förderhöhe der Pumpe folgt:

$$H_F = \frac{e_v}{g}$$

mit

$$e_v = \frac{\Delta p_{v,lok}}{\rho} + \frac{\Delta p_{v,kont}}{\rho}$$

$\Delta p_{v,lok}$: Lokale Druckverluste [N/m^2]

$\Delta p_{v,kont}$: Kontinuierliche Druckverluste [N/m^2]

mit

$$\Delta p_{v,lok} = \zeta * \rho * \frac{v^2}{2}$$

$$\Delta p_{v,kont} = \lambda * \frac{L}{d_i} * \rho * \frac{v^2}{2}$$

ζ: Widerstandsbeiwert von Einbauten [-]

λ: Widerstandsbeiwert der ausgebildeten Rohrströmung [-]

Mit der Förderhöhe und dem Volumenstrom ist die notwendige hydraulische Leistung P_h berechenbar:

$$P_h = \dot{V} * \rho * g * H_F$$

Die kontinuierlichen Druckverluste hängen massgeblich davon ab, ob die Strömung laminar oder turbulent ist. Der Widerstandsbeiwert der ausgebildeten Rohrströmung im laminaren Fall hängt ausschliesslich von der Reynolds-Zahl ab, wohingegen der Widerstandsbeiwert im turbulenten Bereich vom Rohrdurchmesser und der Rauigkeit k abhängt. Zur Ermittlung dieser Werte wird meist das Colebrook-Diagramm verwendet.

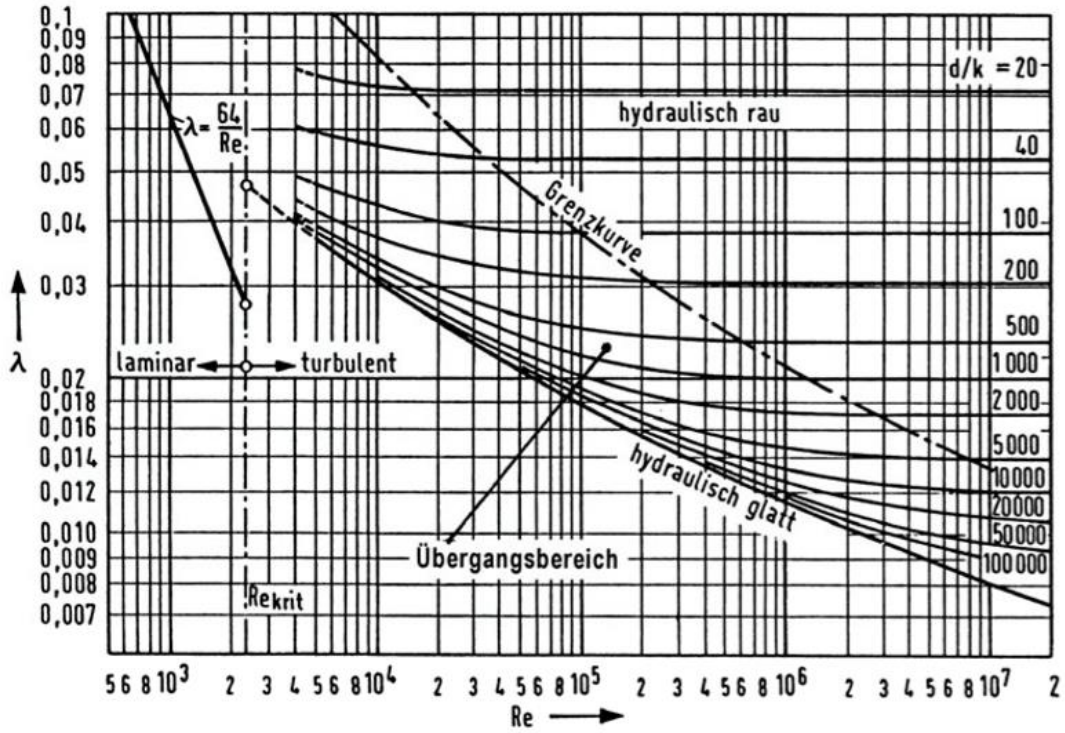


Abbildung 26: Colebrook-Diagramm für den Widerstandsbeiwert λ [Böswirth und Bschorer, 2014]

Die Rauigkeit von PE-Rohren beläuft sich auf $k \approx 0.001$.

Als einzige Einbauten in diesem vereinfachten System gelten in dieser Arbeit die 180°-Krümmer. Sie sind notwendig, um die Rohre über die gewünschte Seefläche horizontal und vertikal zu verteilen. Betrachtet werden sie vereinfacht als zwei 90°-Krümmer. Um den Widerstandsbeiwert des Krümmers aus der untenstehenden Tabelle herauszulesen, ist einzig die Kenntnis des Krümmungsradius R notwendig. Er wird mit $R = 0.3\ m$ festgelegt.

90°-Krümmer; Krümmungsradius *R*

R/d		1	2	4	6
ζ-Wert	glatt	0,21	0,14	0,11	0,09
	rau	0,51	0,30	0,23	0,18

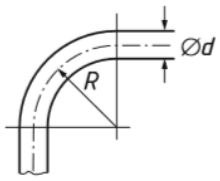


Tabelle 6: Widerstandsbeiwert des 90°-Krümmers [Böswirth und Bschorer, 2014]

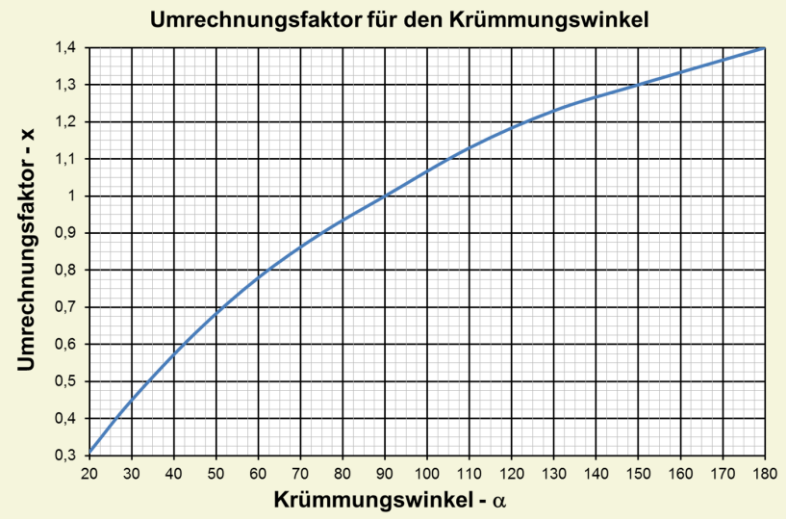
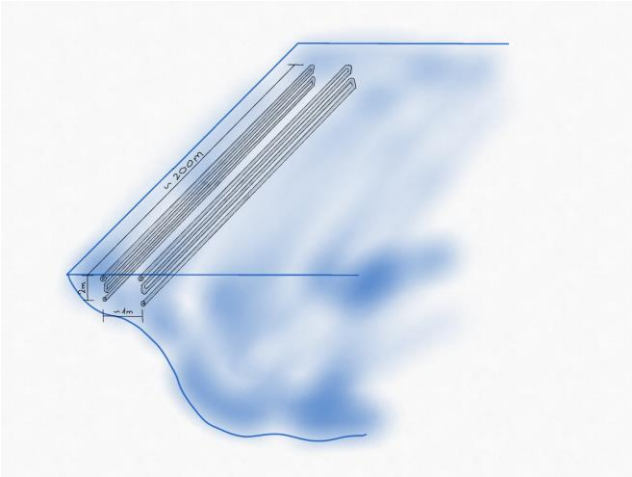
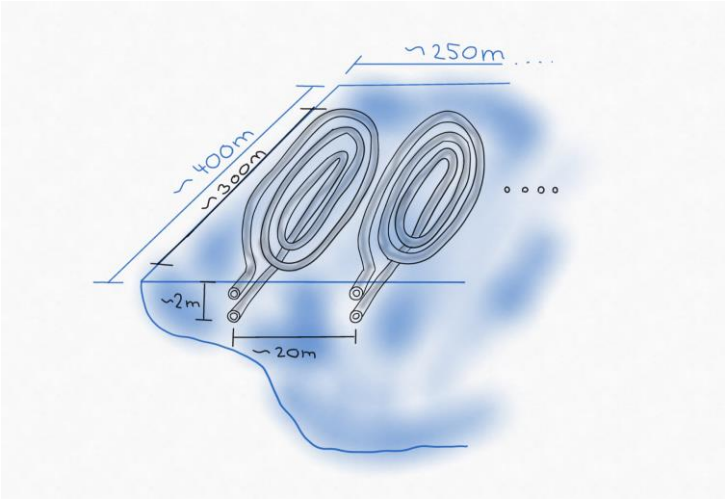


Abbildung 27: Korrekturfaktor Krümmungswinkel des Rohres (Quelle: Schweizer FN)

In der folgenden Tabelle werden die verschiedenen Ideen bezüglich Anordnung und die dazu möglichen Rohrdimensionen aufgelistet. Bei den Rohren handelt es sich um normierte PE-Rohre.

Typ	Skizze	Beschreibung	Anzahl parallele Kreisläufe	Mögliche Rohrdurchmesser [mm]
1		Die Rohre werden in eine Vielzahl von parallelen Kreisläufen unterteilt, die parallel zur Länge des Obersees (ca. 300 m) in einem Abstand von ungefähr einem Meter verlaufen. Die nutzbare Seebreite beträgt dabei ca. 200 m. Je nach benötigter, totaler Rohrlänge wird eine bestimmte Anzahl an Schlaufen gemacht, die eine Tiefe von maximal 2m erreichen.	200	20x2 25x2.3 32x3 40x3.7 50x4.6 63x5.8 75x6.8 90x8.2 110x6.6 200x11.9
2		Die Rohre werden spiralförmig über der gesamten, nutzbaren Fläche von ca. 300 m x 200 m angelegt und verlaufen bis in eine Tiefe von 2 m. Je nach benötigter Rohrlänge werden unterschiedlich viele Windungen gemacht.	10	20x2 25x2.3 32x3 40x3.7 50x4.6 63x5.8 75x6.8 90x8.2 110x6.6 200x11.9

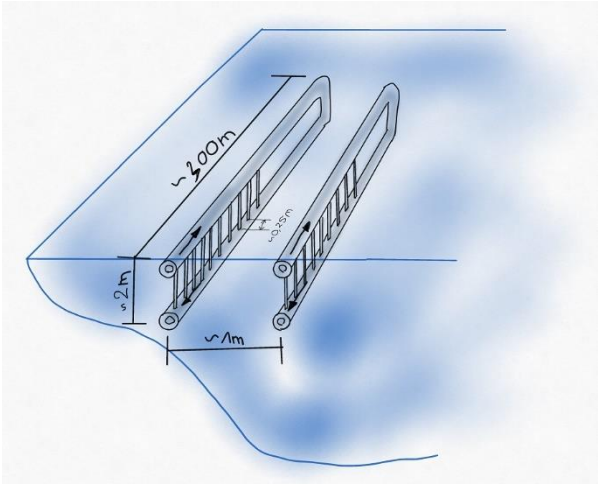
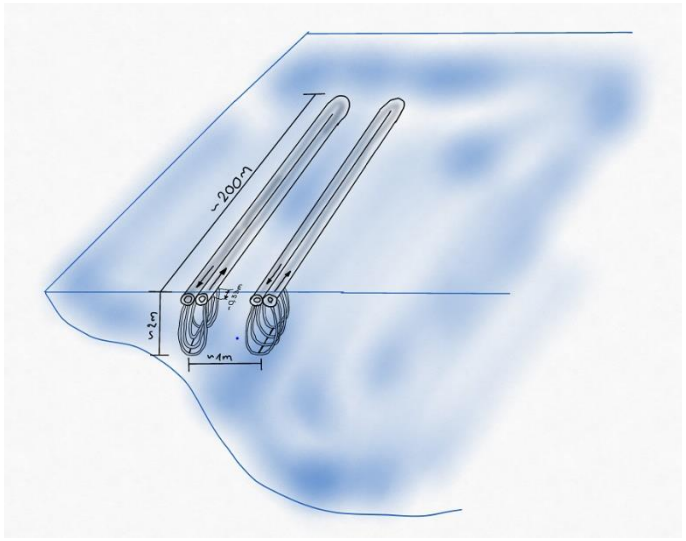
3		Bei dieser Variante werden 200 parallele Hauptrohre als eigene Kreisläufe verlegt, die wiederum viele kleinere, parallel durchflossene Rohre aufweisen. Diese haben einen Abstand von ca. 0.25 m. Die kalte Sole fliesst im oberen Hauptrohr hinein und im unteren heraus. Je nach benötigter Rohrlänge wird der Aufbau in die Tiefe verlegt.	200 à 750 Parallelrohre	8x1 10x1
4		Beim Typ 4 sind ebenfalls 200 parallele Hauptrohre als eigene Kreisläufe verlegt. Dabei bestehen diese Kreisläufe wiederum aus 2 parallel verlegten Hauptrohren, die mit kleineren Rohren (Abstand jeweils ca. 0.3 m) schlaufenartig verbunden sind. In einem Rohr fliesst die kalte Sole hinein und nach dem Durchfluss durch die Schlaufe fliesst die aufgewärmte Sole durch das andere Hauptrohr wieder aus der Wärmeübergangszone.	200 à 600 Parallelschlaufen	8x1 10x1

Tabelle 7: Verschiedene Möglichkeiten, die Wärmeübertragung mittels Rohren umzusetzen

Die detaillierten Ergebnisse aller Kombinationen wurden tabellarisch in einem Excel-Dokument festgehalten, das im digitalen Anhang zu finden ist. In der folgenden Tabelle sind die wichtigsten Ergebnisse von Parametern des Wärmedurchganges ersichtlich. Dabei handelt es sich um einen zu fördernden Wärmestrom von 1 MW.

Rohrdimension	Solegeschwindigkeit [m/s]	Strömungsart [-]	Wärmeübergangs-koeffizient Innenströmung [W/K*m]	Wärmeübergangs-koeffizient Aussenströmung [W/K*m]	Wärmedurchgangs-koeffizient bei 0.5-2 m Eis [W/K*m^2]	Länge eines Kreislaufes [m]
Typ 1						
20x2	0.92	Laminar	157.6	3627	26-32	77’000-92’000
25x2.3	0.56	Laminar	123.6	3676	22-26	73’000-88’000
32x3	0.22	Laminar	37.2	3548	17-21	71’000-86’000
40x3.7	0.34	Laminar	46.7	3584	14-17	69’000-83’000
50x4.6	0.14	Laminar	29.7	3517	11-14	66’000-81’0000.
63x5.8	0.09	Laminar	23.6	3488	9-12	64’000-78’000
75x6.8	0.06	Laminar	19.8	3469	8-10	62’000-76’000
90x8.2	0.04	Laminar	16.5	3451	7-9	60’000-74’000
110x6.6	0.03	Laminar	12.5	3426	6-8	53’000-67’000
200x11.9	0.008	Laminar	6.9	3382	3-5	47’000-61’000
Typ 2						
20x2	18.33	Turbulent	4256	3676	40-54	45’000-60’000
25x2.3	11.28	Turbulent	2731	3627	34-46	42’000-57’000
32x3	6.94	Turbulent	1748	3584	28-39	39’000-54’000
40x3.7	4.42	Turbulent	1155	3548	23-33	37’000-52’000
50x4.6	2.82	Laminar	29.9	3517	12-15	66’000-81’000
63x5.8	1.78	Laminar	23.7	3488	9-12	64’000-78’000

75x6.8	1.25	Laminar	19.9	3469	8-10	62’000-76’000
90x8.2	0.9	Laminar	16.6	3451	7-9	60’000-75’000
110x6.6	0.5	Laminar	12.6	3426	6-8	53’000-67’000
200x11.9	0.15	Laminar	6.9	3382	4-5	47’000-61’000
Typ 3						
8x1	0.0087	Laminar	202.2	3952	60-70	93'000-109'0000
10x1	0.0049	Laminar	151.7	3855	49-58	85'000-100'000
Typ 4						
8x1	0.011	Laminar	202.2	3952	60-70	93'000-109'0000
10x1	0.006	Laminar	151.7	3855	49-58	85'000-100'000

Tabelle 8: Ergebnisse der Parameter für den Wärmedurchgang

Wärmeübergangskoeffizient

Es fällt auf, dass der Wärmeübergangskoeffizient der Aussenströmung ein Vielfaches höher ist als jener der Innenströmung. Das ist auch wahrscheinlich, jedoch ist der Wärmeübergangskoeffizient der Aussenströmung (freie Konvektion) wohl doch etwas zu hoch. Denn nach einer anfänglichen Anströmung mit einer Temperaturdifferenz von bis zu 4 °C (zwischen Wasser und Eis) sinkt diese Temperaturdifferenz (das Wasser hat in nächster Nähe zum Eis auch praktisch 0°C) und damit sinkt auch der Wärmeübergangskoeffizient auf wesentlich niedere Werte. Gemäss Literatur[4] wird zur Rechnung ein konstanter Wert von 150 W/(m²*K) empfohlen, insofern eine leichte, erzwungene Konvektion durch ein Rührwerk im Eisspeicher erfolgt. Im Falle des Obersees ist der Wert wohl etwas tiefer, aber das fällt weniger ins Gewicht, als man vermutet, wenn man die Formel des Wärmedurchgangkoeffizienten anhand eines Beispiels[5] betrachtet:

Mit $\alpha_a = 3382 \frac{W}{m^2 * K}$

$$k_{Eis} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{r_i}{\lambda_R} * \ln\frac{r_a}{r_i} + \frac{r_a}{\lambda_E} * \ln\frac{r_E}{r_a} + \frac{1}{\alpha_a}} = \frac{1}{\frac{1}{5} + \frac{0.0881}{0.43} * \ln\frac{0.1}{0.0881} + \frac{0.1}{2.3} * \ln\frac{0.5}{0.1} + \frac{1}{3382}} =$$

$$\frac{1}{0.2 + 0.0113 + 0.0304 + 0.000296} \approx 4.8$$

Mit $\alpha_a = 100 \frac{W}{m^2 * K}$

$$k_{Eis} \approx 4$$

Wobei wiederum klar ist, dass auch eine solche kleine Änderung des Wertes einen direkten Einfluss auf die berechnete Fläche, bzw. Rohrlänge hat.

[4] Buch «Dynamische Simulation zur wirtschaftlichen Bewertung von komplexen Energiesystemen»
[5] Rohr 200x11.9 mit 0.5 m Eisschicht.

Der Wärmeübergangskoeffizient des Innenstroms steigt mit steigender Solegeschwindigkeit. Dies bedeutet, dass aus Sicht des Wärmeübergangs turbulente Strömungen, die durch kleine Rohrdurchmesser bei gleichem Volumenstrom entstehen, zu bevorzugen sind, da sie zu einem höheren Wärmedurchgangskoeffizienten führen.

Rohrlängen

Obwohl die Rohrdimensionen sehr unterschiedlich sind, variieren die berechneten Längen nicht gross. Grosse Rohre sind jedenfalls viel teurer als kleine Rohre.

Wärmedurchgangskoeffizient

Der Wärmedurchgangskoeffizient sinkt, je mehr Eis um das Rohr ist. Da der Wärmedurchgangskoeffizient auf die Rohrinnenfläche bezogen ist, ist es möglich, dass die Rohrlängen bei grösseren Eisschichten etwas zu hoch sind. Denn die Eisschicht vergrössert die Wärmeübertragungsflache wesentlich. Im Folgenden kann deshalb von der kleinsten berechneten Rohrlänge ausgegangen werden. Die folgende Grafik verdeutlicht den Abfall des Wärmedurchgangkoeffizienten bei steigender Eisschicht:

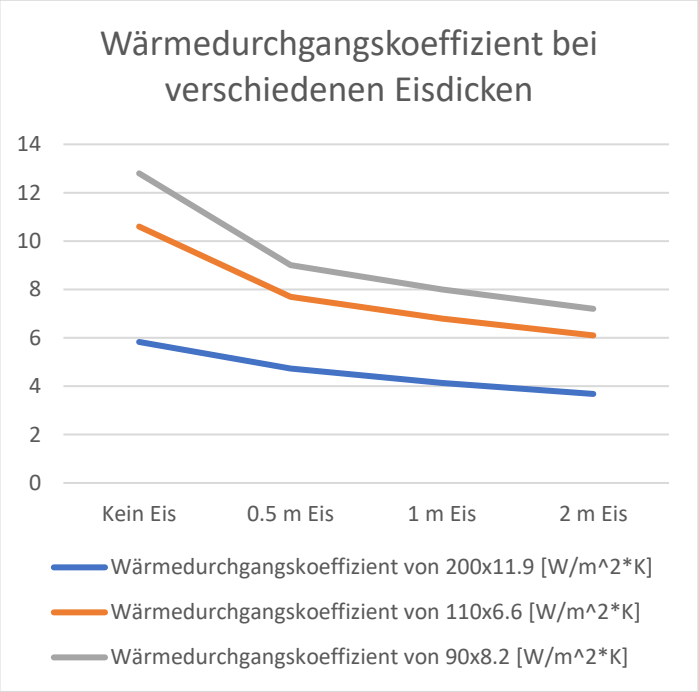


Abbildung 28: Verhalten des Wärmedurchgangkoeffizienten bei verschiedenen Eisdicken

Je nach Anforderungen an die Gewässerschutz kann es sein, dass eine zusätzliche Schutzschicht um den Solekreislauf gemacht werden muss, um eine Leckage zu vermeiden. Dies würde zu einem zusätzlichen Additionstherm im Nenner führen und den Wärmedurchgangskoeffizienten weiter verringern.

Um die Berechnungsresultate zu überprüfen, wird nun ein Vergleich mit Werten von Philippen et al. (2012b) gemacht. Dort werden verschiedene Wärmedurchgangskoeffizienten von verschiedenen Wärmeübertragern aufgezeigt. Einerseits handelt es sich um ein Plattenwärmetauscher aus Edelstahl mit einer Wandstärke von 0.6 mm (Flatplate). Andererseits um Kupferrohre (Cu-Pipe) mit einem Innendurchmesser von 50 mm und Wandstärke 1 mm, sowie PE-Rohe (PP-Pipe) mit einem Innendurchmesser von 50 mm und Wandstärke 5 mm.

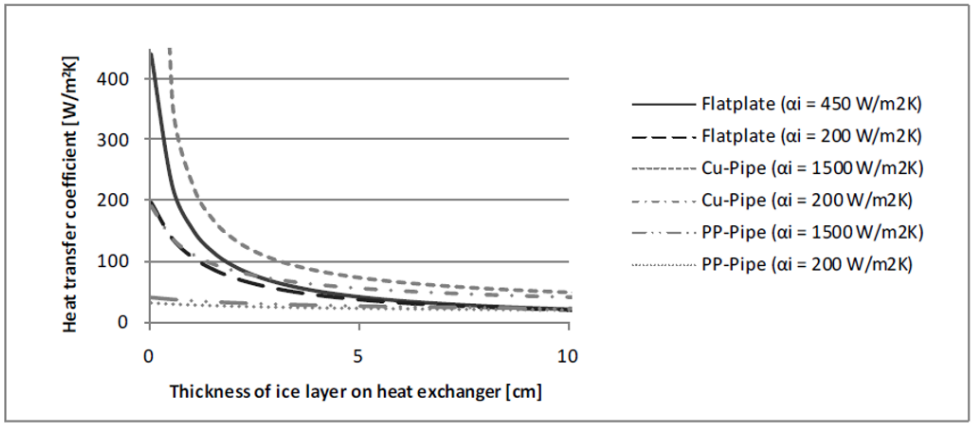


Abbildung 29: Wärmedurchgangskoeffizient verschiedener Wärmeübertrager [Philippen et al. (2012b)]

Diese Werte können nicht eins zu eins auf diese Arbeit übertragen werden, da deren Rohrdimensionen, Volumenströme, etc. nicht übereinstimmen. Jedoch sieht man, dass die Wärmedurchgangskoeffizienten auf einem ähnlichen Niveau stagnieren, wenn die Eisschicht 10 cm oder grösser wird. Was jedoch ersichtlich ist, dass die Wärmeübergangskoeffizienten der Innenströmung wesentlich höher ausfallen, als die Berechnungsbeispiele dieser Arbeit. Dies führt zu Beginn zu einem höheren Wärmedurchgangskoeffizient ohne Eis. Ist man sich jedoch bewusst, dass diese mit zunehmender Solegeschwindigkeit, bzw. Turbulenz steigt, merkt man nach studieren der nächsten Tabelle mit der hydraulischen Bilanz rasch, dass dies komplett unsinnig wäre, diesen Wert bei einer Anlage dieser Dimension zu erhöhen.

Will man den Wärmedurchgangskoeffizient auf andere Art und Weise erhöhen, so ist es einerseits sinnvoll, die Wandstärken der PE-Rohre so klein als möglich zu halten. Andererseits kann über eine Enteisungsschaltung nachgedacht werden. Dies funktioniert jedoch nur, wenn nicht direkt um die Rohre Eis gebildet werden soll. Dazu müssen die Rohre etwas tiefer im See verlegt werden. Die Rohre werden dann zeitweise mit wärmerer Sole, die z.B. durch einen Solarkollektor bereitgestellt wird, durchflossen und das Eis löst sich und steigt aufgrund der niedrigeren Dichte als flüssiges Wasser zur Oberfläche. Der Wärmedurchgangskoeffizient reduziert sich danach auf folgende Gleichung:

$$k_{Wasser} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{r_i}{\lambda_R} * \ln\frac{r_a}{r_i} + \frac{1}{\alpha_a}}$$

In der folgenden Tabelle sind die wichtigsten Ergebnisse von Parametern der hydraulischen Bilanz ersichtlich. Dabei handelt es sich wiederum um einen zu fördernden Wärmestrom von 1 MW.

Rohrtyp	Rohrwiderstandsbeiwert [-]	Förderhöhe der Pumpe für den kontinuierlichen Druckverlust je Kreislauf [m]	Widerstandsbeiwert Krümmer für Krümmungsverhältnis R/d=4 [-]	Förderhöhe der Pumpe für den lokalen Druckverlust als Bsp. 200 Krümmer (Typ 1 & 2) 150'000 Krümmer (Typ 3) 120'000 Krümmer (Typ 4)	Totale Förderhöhe [m]	Totale hydraulische Leistung [kW]
Typ 1						
20x2	0.24	50713.79	0.154	1.33	10142759.54	19748.88
25x2.3	0.32	17785.39	0.154	0.49	3557077.86	6853.31
32x3	0.63	4226.79	0.154	0.08	845359.03	1039.37
40x3.7	0.32	4051.39	0.154	0.18	810278.21	2420.51
50x4.6	0.64	1049.68	0.154	0.03	209935.07	392.67
63x5.8	0.78	400.43	0.154	0.01	80085.69	158.04
75x6.8	0.98	182.43	0.154	0.01	36485.77	68.23
90x8.2	1.23	81.82	0.154	0.00	16364.44	29.31
110x6.6	1.25	31.52	0.154	0.00	6303.53	14.65
200x11.9	2.56	2.23	0.154	0.00	445.50	0.91
Typ 2						
20x2	0.08	3756756.62	0.154	527.44	37568093.67	1457404.81
25x2.3	0.08	1054788.56	0.154	199.74	10548085.33	409356.49
32x3	0.08	294578.59	0.154	75.61	2945861.54	114255.50
40x3.7	0.08	84760.00	0.154	30.67	847630.62	32917.19
50x4.6	0.03	21146.46	0.154	12.48	211477.05	7967.52
63x5.8	0.04	7889.32	0.154	4.97	78898.13	3079.36

75x6.8	0.05	3775.97	0.154	2.45	37762.15	1471.17
90x8.2	0.05	1830.05	0.154	1.27	18301.77	737.65
110x6.6	0.07	519.19	0.154	0.39	5192.25	201.11
200x11.9	0.14	41.65	0.154	0.04	416.58	16.04
Typ 3						
8x1	91.43	5467.05	0.154	0.09	820057667.19	2123.37
10x1	71.11	924.61	0.154	0.03	138691811.11	359.57
Typ 4						
8x1	55.17	5274.00	0.154	0.11	632879890.44	2071.93
10x1	71.11	1386.34	0.154	0.03	166360856.30	528.13

Tabelle 9: Ergebnisse der Parameter zur Auswertung der hydraulischen Bilanz

Bereits zu erwarten waren die hohen Verluste der kleinen Rohre mit hohen Solegeschwindigkeiten. Das bringt enorm hohe, geforderte hydraulische Leistungen der Pumpe. Diese scheinen oft auf den ersten Blick überwindbar. Wenn man jedoch gleichzeitig den kleinen Volumenstrom von ca. 0.036 m^3/s betrachtet, bringt dies extreme Anforderungen an eine Pumpe. Bis auf die grösseren Rohre von aller Typen mit wenigen hundert Metern Förderhöhe der Pumpe, scheint kaum eine Variante umsetzbar. Derart gross sind die kontinuierlichen Druckverluste.

Aufgrund dessen, dass die kontinuierlichen Druckverluste wesentlich höher sind als die lokalen, ist es nicht weiter schlimm, dass für die Krümmer eine fiktive Anzahl an Krümmer gewählt worden ist, die sehr ungenau ist. Sie fallen ohnehin kaum ins Gewicht.

Aufgrund der schlechten Ergebnisse wird auf eine Berechnung mit 5 MW Wärmestrom verzichtet.

Konzept 2: Platten

Dieses Konzept setzt die Wärmeübertragung mittels Platten um. Wie zu Beginn des Kapitels beschrieben, wird darauf nicht detailliert eingegangen. Es werden keine Berechnungen getätigt, sondern nur auf deren Vor- und Nachteile eingegangen.

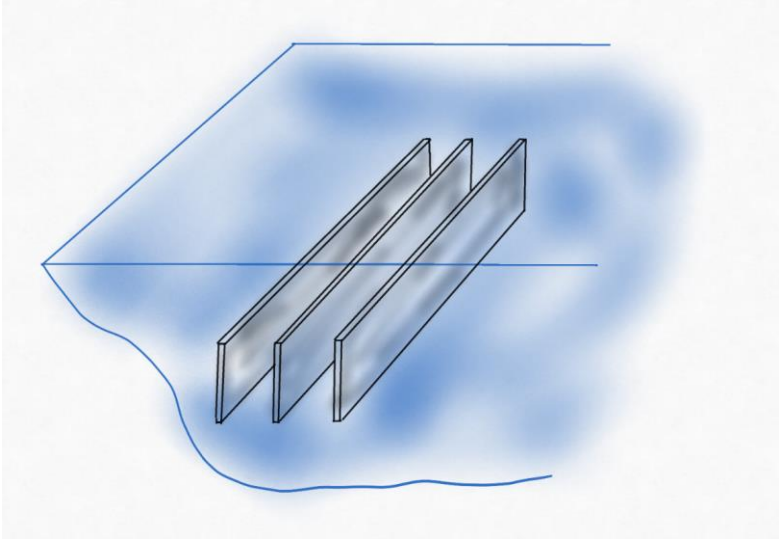


Abbildung 30: Wärmeübertragung mittels Platten

Der Vorteil der Wärmeübertragung über Platten ist, dass Platten eine grosse Fläche haben und damit einen grossen Wärmestrom ermöglichen. Andererseits muss beachtet werden, dass diese Oberfläche sehr schnell mit Eis überzogen sein wird, was den Wärmedurchgang stark senkt. Im Gegensatz zu Rohren, wo die Eisschicht durch ihren radialen Zuwachs ebenso zu einem Flächenanstieg führt, bleibt die Übertragungsfläche bei Platten praktisch gleich gross. Wenn man eine Wärmeübertragung mittels Platten umsetzen möchte, so müssen diese in tieferen Schichten des Sees platziert werden, sodass sich kein Eis rund herum bilden muss. Aufgrund der grossen Temperaturdifferenz zwischen Soleeintritt und dem Wasser wird sich jedoch trotzdem spontan Eis bilden. Dieses muss zyklisch von den Platten gelöst werden, indem wie bei den Rohren bereits genannt, z.B. wärmere Sole die Platten durchfliesst. Die gebildeten Eisplatten wandern dann zur Oberfläche.

6.3.2 Offener Kreislauf

Auf den offenen Kreislauf wird nicht detailliert eingegangen. Es wird einzig der Prozess erklärt, um den Unterschied zum geschlossenen Kreislauf zu verdeutlichen.

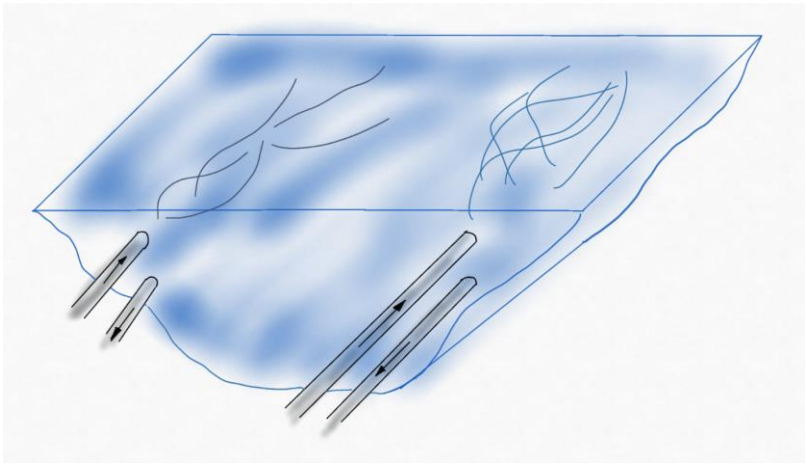


Abbildung 31: Offener Primärkreislauf

Offener Kreislauf bedeutet, dass die Wärme nicht indirekt über einen Solekreislauf zur Wärmepumpe transportiert wird, sondern dies direkt mittels Transportes von Seewasser zur Wärmepumpe und dem dortigen Wärmeübertrager erfolgt. Die verwendete Sole im geschlossenen Kreislauf, ein Wasser-/Glykolgemisch, hat im Gegensatz zu Seewasser einen Kälteschutz von <-50 °C. Das bedeutet, dass eine Soletemperatur von -8 °C und damit ein ΔT von 8 K ohne Probleme zu erreichen ist, ohne dass die Flüssigkeit erstarrt und die Anlage gegebenenfalls Schaden nimmt. Wasser gefriert bekanntlich bei 0 °C und kann deshalb nicht so stark abgekühlt werden. Je nachdem, in welcher Schicht das Wasser im Winter abgesogen wird, hat es eine Temperatur zwischen 0 und 4 °C. Erwünscht ist für eine gute Leistungszahl der Wärmepumpe (COP) natürlich möglichst warmes Wasser. Geht man davon aus, dass aus tieferen Schichten 4 °C warmes Wasser abgesogen wird, ist theoretisch maximal ein ΔT von 4 K erreichbar, wobei dies aufgrund der Gefriergefahr nicht zu empfehlen ist. Realistischer ist ein ΔT von maximal 2-3 K. Vergleichbare Anlagen zur thermischen Nutzung von Seen (im sensiblen Bereich) arbeiten mit einem ΔT von 0.5 K.

Um dabei einen Wärmestrom von 1 MW mit einem ΔT von 3 K zu transportieren, ist folgender Massenstrom nötig:

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}_{prim}}{c_p * \Delta T} = \frac{1'000'000\ W}{4'180\frac{J}{kg * K} * 3K} = 79.75\ kg/s$$

Die höhere Wärmekapazität von Wasser im Gegensatz zu einer Wasser-/Glykolmischung wie z.B. Tyfocor mit $c_p = 3'160\frac{J}{kg*K}$ wirkt dem höheren Massenstrom durch das geringere ΔT etwas entgegen. Schlussendlich wird der Massenstrom aber doch bedeutend höher als mit z.B. Tyfocor bei einem ΔT von 8 K:

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}_{prim}}{c_p * \Delta T} = \frac{1'000'000\ W}{3'160\frac{J}{kg * K} * 8K} = 39.6\ kg/s$$

Bei einer allfälligen technischen Umsetzung mit einem offenen Kreislauf kann man sicherlich von bereits bestehenden Anlagen zur thermischen Nutzung von Seen (im sensiblen Bereich) profitieren, da diese meistens auf diese Weise realisiert werden. Was unklar ist und auf jeden Fall in einer späteren Phase geprüft werden muss, ist, inwiefern eine Einleitung von kaltem Wasser unterhalb einer Eisschicht die Bildung von Eis fördert. Vorstellbar ist nämlich, dass sich dadurch einzig das verbleibende Wasser unter der Eisschicht abkühlt.

6.3.3 Vergleich offener/ geschlossener Kreislauf

Die Vor- und Nachteile von offenen und geschlossenen Primärkreisläufen werden in der folgenden Tabelle aufgezeigt.

Vorteile:

Geschlossener Kreislauf	Offener Kreislauf
Eisbildung direkt an der Stelle, wo man die Rohre setzt	Kleinere Pumpenleistung, da nur ein Wärmeübertrager.
Kleinerer Massenstrom durch grösseres ΔT	Tiefere Investitionskosten, da nur ein Transportsystem (Rohre und Pumpe) zur Wärmepumpe nötig.
Wärmestrom über den Volumenstrom der Sole regulierbar. Kein direkter Einfluss auf den See.	Ausserhalb des Sees ist kaum bemerkbar, das der See thermisch genutzt wird.
Die natürliche Schichtung wird kaum beeinflusst, da die Wärme der obersten Schicht entzogen wird.	

Tabelle 10: Vorteile von geschlossenen, bzw. offenen Primärkreisläufen

Nachteile:

Geschlossener Kreislauf	Offener Kreislauf
Extrem hohe Förderhöhe	Nicht klar, wie sich der Wärmeentzug auf die Eisbildung an der Oberfläche auswirkt.
Umweltgefährdende Verwendung von Sole. Aufwändige Massnahmen zur Verhinderung und Detektion von Leckage nötig	Diese Umsetzung ist auf natürliche Konvektion angewiesen, damit mit «konstanter» Wassereintrittstemperatur gerechnet werden kann. Evtl. Unterstützung nötig.
Wärmeübertrager im See nötig. Der See wird voller Technik.	Mögliche Schädigung von Mikroorganismen, die in den Kreislauf eingesogen werden und ggf. durch das hohe, plötzliche ΔT abgetötet werden.
Hohe Investitions- und Betriebskosten (Wärmeübertrager, Sole)	

Tabelle 11: Nachteile von geschlossenen, bzw. offenen Primärkreisläufen

6.4 Pumpen

Da nur der geschlossene Primärkreislauf detailliert betrachtet und berechnet wurde, kann ausschliesslich eine konkrete Aussage bezüglich Pumpenwahl dafür gemacht werden. Die Berechnung zeigt, dass ein kleiner Volumenstrom bei grosser Förderhöhe gefordert ist. Am 1 MW- Wärmenutzungs-Beispiel und bei Verwendung von einem Wärmeübertrager mit dem 200x11.9 Rohr beträgt die nötige Förderhöhe ungefähr 450 m.

Gemäss der folgenden Abbildung ist eine mehrstufige Radialpumpe zu empfehlen und der Volumenstrom ist dafür recht tief. Die benötigte hydraulische Leistung ist zwar «nur» 1-16 kW (je nach Anordnung der Rohre), trotzdem wird es schwierig werden, eine passende, serienmässige Pumpe zu finden. Der Autor hat keine passende gefunden, deshalb müsste diesbezüglich ein Pumpenhersteller kontaktiert und eine (Kosten-)Abschätzung seinerseits eingefordert werden.

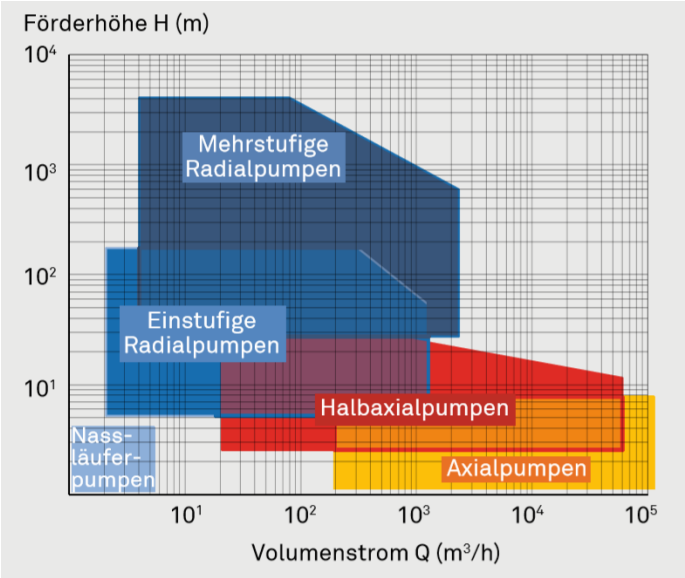


Abbildung 32: Q-/H-Diagramm zur Typologie von Pumpen [topmotors.ch, 2019]

Eine passende Pumpe für den offenen Primärkreislauf bzw. für ein Fernwärmenetzwerk zu finden, ist sicherlich wesentlich einfacher, denn dort ist der zu fördernde Volumenstrom deutlich höher und die Druckverluste (und damit die Förderhöhe) wesentlich tiefer.

6.5 Komplettlösungen und Wärmepumpen

Je nach Umsetzung der Primärseite, bzw. ob der Kreislauf geschlossen oder offen ist, werden Wasser/Wasser-Wärmepumpen oder Sole/Wasser-Wärmepumpen verwendet. Die Anforderung an die Wärmepumpe ist, dass sie bei unterschiedlichen Wärmespreizungen effizient laufen müssen. Die Anforderungen ähneln denen der Luft/Wasser-Wärmepumpen. Entweder muss die Maximaltemperatur des Obersees, bzw. des Speichers und der Betriebsbereich des Verdampfers der Wärmepumpe aufeinander abgestimmt sein oder die Eintrittstemperatur zum Verdampfer muss durch ein Mischventil geregelt werden.

Auf dem Markt gibt es bisher nur ganz wenige Komplettlösungen für Eisspeicher. Diese sind für die Anwendung im kleinen Leistungsbereich um ca. 10 kW, vor allem für Einfamilienhäuser ausgelegt. Sie beinhalten vom Eisspeicher über die Wärmepumpe und der Umwälzpumpen für Sekundär- bzw. Tertiärkreislauf (gem. Definition dieser Arbeit) alle notwendigen Komponenten. Für die Umsetzung dieses Projekt bedeutet dies, dass höchstens das Teilpaket der Wärmepumpe beim dezentralen Fernwärmenetz als serienfertige Lösung für die Verbraucher in Betracht gezogen werden kann. Der Eisspeicher, bzw. die Wärmequelle ist anderswertig über ein Fernwärmenetz geregelt. Zentrale Temperaturerhöhungen des gesamten Fernwärmenetzes bedürften weit grösserer Anlagen.

Im Folgenden wird kurz auf eine Wärmepumpen-Produktserie der Firma Viessmann eingegangen, das Bestandteil eines Eisspeicher-Komplettsystems ist. Es handelt sich dabei um eine Sole/Wasser-Wärmepumpe, genannt Vitocal, mit den Ausführungen 300-G und 350-G. Sie besitzen ein RCD System (Refrigerant-Cycle-Diagnostic-System) und ein elektronisch gesteuertes Expansionsventil für Heizleistungen von 6-17 kW. Der Betriebsbereich ist B0/W35, d.h. ein Soleeintritt von 0 °C und eine Vorlauftemperatur von 35 °C. Die Wärmepumpen arbeiten dabei in einem Bereich von -10 °C bis 25 °C Soletemperatur.

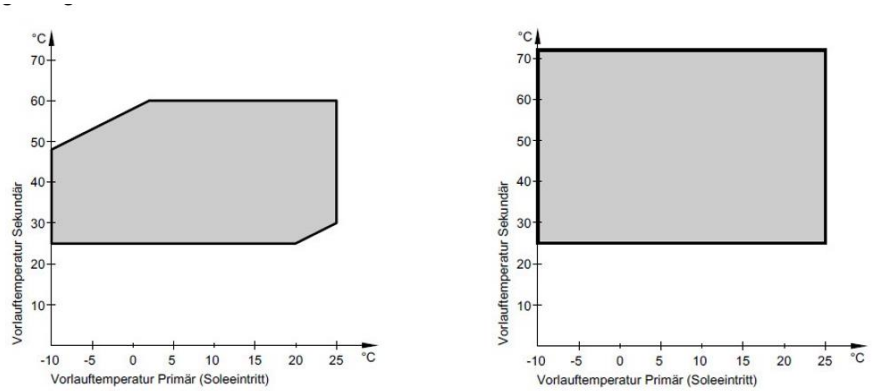


Abbildung 33: Einsatzgrenzen der Vitocal 300-G (links) und Vitocal 350-G (rechts) nach EN 14511. Temperaturspreizung primärseitig 3 K, sekundärseitig 5 K. [BFE, 2014]

Die Kosten für ein solches Wärmepumpen-Paket belaufen sich auf CHF 12'000-18'000 je nach Ausführung und Heizleistung (5.7 kW bis 10.4 kW).

Die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe (JAZ) ist das Verhältnis der über das Jahr abgegebene Wärme Q_{Nutz} zur aufgenommenen, elektrischen Energie E_a.

$$JAZ = \frac{Q_{Nutz}}{E_a}$$

Messungen und Betriebserfahrungen zeigen, dass mit heutigen, korrekt dimensionierten Eisspeiche-Wärmepumpen ähnliche JAZ erreicht werden können wie solche von Erdsonden-Wärmepumpen. Eisspeicher-Wärmepumpen sind bedeutend effizienter Luft/Wasser-Wärmepumpen. Der erwartete Wert liegt zwischen 3.7 und 4. Hohe Vorlauftemperaturen sind jedoch zu vermeiden, weswegen eine Nutzung im Niedertemperaturbereich, zum Beispiel Raumheizungen von Turnhallen oder Wasserheizung in Hallenbädern zu empfehlen ist. Tendenziell sind grosse Eisspeicher, wie es der Obersee darstellt, jedoch toleranter für höhere Vorlauftemperaturen, da die Quellentemperatur nur wenig absinkt.

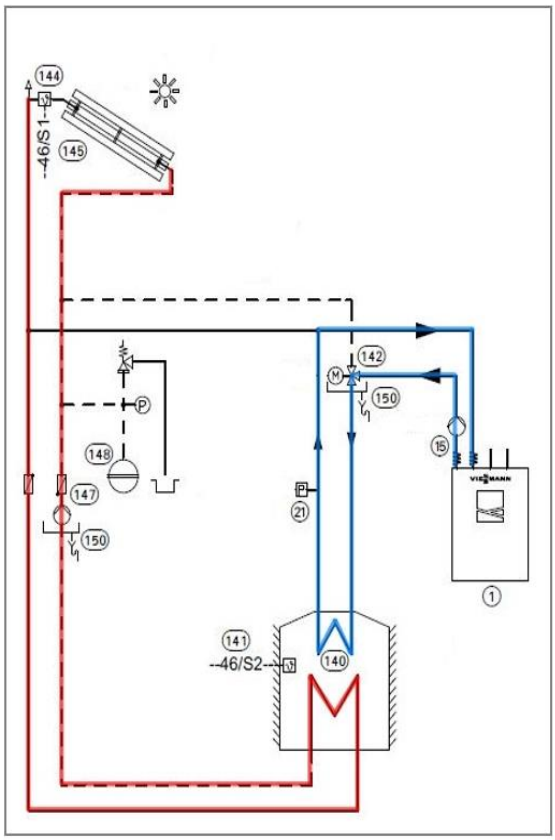


Abbildung 34: Eisspeicher-Komplettsystem mit Solarabsorbern der Firma Viessmann. [BFE, 2014]

Gemeinsam haben alle Eisspeicher-Komplettlösungen, dass zusätzlich Sonnenkollektoren eingesetzt werden. Diese dienen der Regeneration des Eisspeichers und/oder als zusätzliche Wärmequelle für die Wärmepumpe. Der Kollektortyp wird je nach Eisspeicher, Wärmeleistung- und bedarf ausgewählt und dimensioniert. Die Kollektorfläche beträgt ungefähr 1.5-2 m^2 pro kW Heizleistung.

7. Umwelt

7.1 Einfluss auf Flora & Fauna

Wassertemperatur

Aufgrund der fehlenden Wassertemperatur-Aufzeichnungen ist wenig über den natürlichen Temperaturverlauf und die saisonale Schichtung des Obersees bekannt. Abschätzungen dazu wurden im Berechnungsteil gemacht, müssen aber in einer weiteren Stufe überprüft werden. Der klimatische Trend zeigt klar auf, dass die durchschnittliche Wassertemperatur in Zukunft steigen wird. Die thermische Nutzung des Sees wirkt diesem Trend entgegen, was den Pflanzen und Tieren im See zugutekommt, die empfindlich auf die steigenden Wassertemperaturn reagieren. Bekanntlich steigt zum Beispiel das Algenvorkommen mit steigender Wassertemperatur. Diese verursachen eine Trübung des Sees, wodurch wiederum weniger Licht an tiefere Stellen durchdringt. Dies mindert das Wachstum von Wasserpflanzen, die weiter unten am Boden wachsen und Nahrungsgrundlage, sowie Versteckmöglichkeiten für Fische, Frösche usw. darstellen.

Lokale Temperaturschwankungen kennt das System See bereits. Interne Wellen können vertikale Auslenkungen von mehreren Metern in der Wassersäule verursachen. Deshalb kann die Temperatur einer bestimmten Tiefe innerhalb Bruchteile von Stunden um mehrere Grad schwanken. Dies wird vor allem im Herbst bei Stürmen beobachtet. Solche Temperaturschwankungen treten im Bereich der Wärmeübertragung oder der Wasserfassung (offener Kreislauf) auf.

Wie Mikroorganismen, die bei einem offenen Kreislauf «eingesogen» wurden, auf eine rasche Abkühlung von mehreren Grad reagieren, ist unbekannt. Dazu muss eine Fachperson gefragt werden.

Wärmeübertrager

Betrachtet man die Umsetzung mittels geschlossenen Kreislaufs, so würde der See zumindest saisonal voller Rohre oder Platten, da die Wärmeübertragung vom See auf den Solekreislauf direkt im See stattfindet. Der Wärmeübertrager im See muss durch Gestänge am gewünschten Ort angebracht werden. Dazu ist es zwingend, dieses am Grund des Sees zu verankern. Dies verursacht einerseits grössere Umbauarbeiten im See und andererseits verursacht die Konstruktion Schatten, sodass weniger Licht in die tieferen Schichten vordringt. Es besteht ausserdem die Gefahr, dass sich Tiere an der Konstruktion verletzen. Sie können steckenbleiben oder sich an scharfen Kanten schneiden. Einige Vorteile hat die Konstruktion für einzelne Lebewesen. Dies seien zum Beispiel Muscheln, die sich an der Konstruktion ansiedeln oder junge Fische, Frösche oder Molche, die sich zwischen den Rohren verstecken, um sich vor Fressfeinden zu schützen.

Sekundärkreislauf (Wärmenetz)

Da das Wärmenetz, bzw. die Rohre zur Verteilung der Wärme an die Verbraucher meist unterirdisch installiert werden, hat ein solches Netz kaum Auswirkungen auf Lebewesen an der Oberfläche. Einzig kann der Untergrund um die Rohre abkühlen und gegebenenfalls gefrieren. Dies hat höchstens Auswirkungen auf die (Kleinst-) Lebewesen in unmittelbarer Nähe der Rohre.

Eis

Der Obersee gefriert praktisch jedes Jahr, nur dessen Eisdicke und Eisqualität variiert von Jahr zu Jahr bzw. auch von Tag zu Tag. Sämtliche Lebewesen im Obersee haben sich deshalb darauf eingestellt, dass der See im Winter gefriert. Da die maximalen Eisdicken des Obersees nicht aufgezeichnet wurden, wird aufgrund der Unterlagen des Eismeisters vom Jahr 2018 davon ausgegangen, dass in extremen Wintern maximal eine Eisdicke von 50 cm auftraten. Normal sind 10-20 cm. Es ist nicht klar, wie die Lebewesen auf einen besonders «harten» Winter reagieren, wo die Eisschicht dicker ausfällt und möglicherweise länger bestehen bleibt als normal. Deshalb hat man auch keine Kenntnis, welchen Einfluss eine Eisschicht von 2 m im Gegensatz zu einer Eisschicht von 0.5 m auf die Lebewesen im See hat. Dies muss sicherlich mit Fachpersonen geklärt werden.

7.2 Einfluss auf Gemeinde, Bevölkerung und Tourismus

Die Einflüsse der Anlage auf die Gemeinde, Bevölkerung und den Tourismus werden nach Jahreszeiten aufgeteilt. So gibt es Auswirkungen, die ganzjährig auftreten und andere, die nur saisonal in den Sommer- oder Wintermonaten auftreten. Mit Sommermonaten sind diejenigen Monate im Jahr gemeint, in welcher der Obersee nicht gefroren ist. Die Wintermonate dagegen betreffen sämtliche Monate, in welchen der Obersee gefroren ist.

7.2.1 Ganzjährig

Pumpwerke

Pumpwerke sind auf jeden Fall nötig, egal ob der Primärkreislauf offen oder geschlossen ist. Auch sind Pumpen notwendig, um die Wärme im Sekundärkreislauf zu den Verbrauchern zu transportieren. Je nach technischer Umsetzung reicht eine Pumpstation oder es müssen mehrere installiert werden. Da sich diese in einem kleinen Gebäude befinden und der See direkt an das Ortszentrum von Arosa angrenzt, fallen diese Gebäude kaum auf. Die Pumpen selbst verursachen sicherlich Geräusche. Der Lärmpegel kann jedoch eingegrenzt werden, indem man eine geräuscharme Pumpe verwendet, diese möglicherweise etwas in den Untergrund baut und das Gebäude gut dämmt.

Sekundärkreislauf (Wärmenetz)

Da das Wärmenetz, bzw. die Rohre zur Verteilung der Wärme an die Verbraucher meist unterirdisch installiert werden, hat ein solches Netz kaum Auswirkungen das Gemeindebild oder die Touristen. Da die Rohrleitungen teilweise auf öffentlichen (zu bevorzugen) und auf privaten Grundstücken verläuft, muss sicherlich eine Einwilligung und gegebenenfalls eine Entschädigung dieser Parteien erfolgen. Für den Rest der Bevölkerung wirkt sich das Projekt höchstens in der Bauphase aus, wo es kurzfristig zu Beeinträchtigungen im Verkehr kommen kann. Oder dann, wenn das Projekt mit öffentlichen Geldern finanziert oder unterstütz wird.

Wärmepumpen

Werden die Wärmepumpen dezentral in das Fernwärmenetz eingebunden, so hat dies kein Einfluss auf die Touristen und die Gemeinde. Es betrifft die Verbraucher selbst und möglicherweise die Nachbarn, wenn ein hoher Lärmpegel durch den Verdichter der Wärmepumpe entsteht.

Erfolgt die Umsetzung zentral, so wird ein grösseres Gebäude in der Nähe des Obersees gebaut werden müssen, wo sich die Wärmepumpe und das gesamte Pumpwerk des Primär- und Sekundärkreislaufes befindet. Dafür muss ein Stück Land in Zentrumsnähe für dieses Gebäude weichen und es kann, wie oben genannt, zu Lärm führen.

7.2.2 Sommermonate

Geschlossener Primärkreislauf

Wird die Wärme des Sees direkt im See auf einen Solekreislauf übertragen, führt dies zu einer aufwändigen Konstruktion von Rohren oder Platten und Gestängen. Je nachdem, ob sich die Konstruktion nur saisonal oder ganzjährig im See befindet, hat sie einen unterschiedlichen Einfluss auf das Gemeindebild und die Bevölkerung. Befindet sich ein Rohr-Wärmeübertrager das ganze Jahr über im See und bleibt an der Oberfläche, so ist dies für die Bevölkerung und die Touristen in der Zeit, in welcher der See nicht gefroren ist, von aussen sichtbar. Das macht den Bergsee, der bisher ein naturnahes Ufer hat, unnatürlich. Zudem ist das Baden, Rudern oder Tauchen im Obersee kaum noch möglich. Hier muss jedoch angefügt werden, dass es sich beim Obersee auch nicht wirklich um einen Badesee handelt. Rudern und Tauchen ist jedoch möglich. Der eigentliche Badesee von Arosa ist der Untersee. Auch wenn der Anblick der Anlage im Obersee für technikbegeisterte Leute interessant ist, lebt die Gemeinde im Tourismusbereich vor allem von ihrer eindrücklichen Naturkulisse, in welcher die Gemeinde und der Obersee eingebettet ist. Dies könnte zu Unverständnis seitens Bevölkerung und Tourismus führen, obwohl die Anlage eigentlich eine sinnvolle Ressource von Energie nutzt, die eine grosse Menge an nicht-erneuerbaren Energie, wie zum Beispiel Heizöl einspart. Diesen negativen Aspekten kann entgegengewirkt werden, wenn die Konstruktion jeweils in den wärmeren Monaten entfernt oder tiefer in den See abgelassen wird. Dies führt jedoch zu erheblichen Mehrkosten. Im Gegensatz zu den Rohren sind die Platten-Wärmeübertrager tiefer im See installiert und kaum sichtbar.

Offener Primärkreislauf

Findet die Wärmeübertragung des Sees auf den Verdampfer der Wärmepumpe extern statt und fördert man das Seewasser direkt zu den Wärmepumpen, entfällt die gesamte Technik im See bis auf ein oder mehrere unterirdische Ab- und Zuläufe. Diese haben kaum einen Einfluss auf das Gemeindebild, die Bevölkerung und die Touristen, da dies nicht sichtbar ist.

7.2.3 Wintermonate

In den Wintermonaten ist die Anlage, die im See installiert ist, nicht oder kaum zu sehen. In diesen Monaten profitieren alle Parteien von einem zugefrorenen See, der für unterschiedliche Aktivitäten der Bevölkerung und der Touristen genutzt werden kann.

Aufgrund der guten Eisqualität bzw. der stabilen Eisschichtung durch kontinuierlichen Wärmeentzug kann die Eisfläche bereits früh zur Begehung freigegeben werden. Dies erfolgt bei 15 cm Eisdicke und kann, je nach klimatischem Verlauf, bereits Anfang Dezember erfolgen. Die Traglast der Eisschicht wird genügend gross, dass auch grössere Fahrzeuge den See befahren können. So kann auch eine Piste präpariert werden, die zum Beispiel für die Durchführung der Pferderennen notwendig ist oder eine Langlaufloipe ermöglicht. Andererseits kann auch das blanke Eis verarbeitet werden, sodass für das Schlittschuhlaufen perfekte Verhältnisse bestehen. Dadurch hat Arosa eine Klima-unabhängige, offene Eisbahn, die in dieser spektakulären Bergkulisse sicherlich zu einer touristischen Attraktion wird. Dies kann entsprechend gefördert werden, indem verschiedene Anlässe, z.B. Eishockey- oder Eiskunstlauf-Tourniere, Profi-Eishockey-Spiele oder Eiskunstlauf-Vorführungen durchgeführt werden. Insofern die Gemeinde dies wünscht, ist auch eine Beleuchtung der Eisfläche von unten denkbar, die den Obersee mit dem Gemeindezentrum von Arosa im Hintergrund in der Nacht zu einem einmaligen Spektakel verwandelt.

8. Kosten

Die Aufgabe der Investitionsrechnung ist es zu beurteilen, ob und welchen Vorteil Investitionen haben. Die Investitionsrechnung von Fernwärmenetzen setzt sich aus drei Komponenten zusammen. Es handelt sich um folgende Komponenten:

- Fernwärmeerzeugung
- Netz und Netzverluste (inkl. Pumpstation und Druckhaltungsanlage)
- Verbraucheranschlüsse

Bei der Fernwärmeerzeugung handelt es sich um den Obersee als Wärmequelle mit dem Primärkreislauf, der dem See die Wärme entziehen und diese abtransportieren soll. In dieser Arbeit entspricht der Sekundärkreislau dem Netz. Die Verbraucheranschlüsse beinhalten sämtliche Installationen, die von der Hauptleitung zu einem Wärmeverbraucher, sprich dem Kunden führen. Der Tertiärkreislauf beim Wärmeverbraucher fliesst nicht in die Investitionsrechnung des Fernwärmenetzes ein. Es ist Sache des Kunden.

Aufgrund dessen, dass es sich bei dieser Arbeit um eine Art Vorstudie handelt, kann keine detaillierte Investitions- und Betriebskostenrechnung des gesamten Fernwärmenetzes gemacht werden. Es wird deshalb auch nicht erklärt, wie diese Investitionsrechnungen im Detail gemacht werden und welche Möglichkeiten (Annuitätenmethode, Kapitalwertmethode, etc.) es gibt. Schwerpunkt liegt in dieser Arbeit auf dem Primärkreislauf. Da man hierbei jedoch noch keine Erfahrung oder Referenzanlagen hat und es sich bei den Komponenten praktisch ausschliesslich um Spezialanfertigungen handelt, sind die Kosten schwer abzuschätzen. Es werden in diesem Kapitel einige Anhaltswerte im Bereich der Materialkosten genannt, jedoch sind diese sehr unsicher, da zu einem ersten Entwurf des Primärkreislaufes noch weitere Abklärungen und Versuche gemacht werden müssen. Im Bereich der Wärmepumpen, bzw. dem Sekundär- und Tertiärkreislaufes kann auf bestehende Anlagen und deren Erfahrung zurückgegriffen werden. Dort ist eine grobe Abschätzung möglich, sobald in einer weiteren Studie der Wärmebedarf der potenziellen Wärmeverbraucher/ Kunden klar ist.

Für die Auslegung des Wärmeverteilsystems im Detail wird auf das «Planungshandbuch Fernwärme» der Arbeitsgruppe QM Fernwärme verwiesen. Dort ist unter anderem beschrieben, welchen Einfluss Temperaturspreizung und Temperaturniveau auf die Effizient der Wärmeerzeugung haben und wie sich die Dimensionierung der Rohre, Rohr- und Dämmmaterial auf die Investitionsrechnung, Wärmeverluste und Hilfsenergie auswirken.

8.1 Kosten Primärkreislauf

Die Kosten werden nur für den geschlossenen Kreislauf aufgezeigt. Fällt der Entscheid auf einen offenen Kreislauf, muss dies gemäss einem üblichen Fernwärmenetz, wie oben beschrieben, ausgelegt werden.

Die Hauptkosten lasten auf folgenden Posten beim geschlossenen Kreislauf:

- Rohre
- Pumpe(n)
- Gestänge zur Fixation der Rohre im See
- Sole

Im Folgenden wird eine Kostenabschätzung für die Posten Rohre, Pumpe(n) und Sole gemacht.

Rohre und Pumpe(n)

Aufgrund der unrealistisch hohen Förderhöhen der Pumpe werden die Rohrauslegungen Typ 3 und 4 nicht berücksichtigt. Auch machen alle Rohrdimensionen unter der grössten kaum Sinn. Deshalb erfolgt die Materialkosten-Rechnung des Typ 1 und 2 mit der Rohrdimension 200x11.9. Verwendet wird die kleinste berechnete Rohrlänge, wie bereits erwähnt, aufgrund des Rohrinnenwand-Bezugs.

Rohrdimension	Preis [CHF/m][6]	Geforderte Minimallänge [m]	Materialkosten [CHF]	Förderhöhe der Pumpe [m]	Volumenstrom total [m^3/s]
Typ 1					
200x11.9	73.26	47'000	3'443'220	445	0.036
Typ 2					
200x11.9	73.26	47'000	3'443'220	416	0.036

Tabelle 12: Materialkosten der Rohre und Anforderungen an die Pumpe

Die Kosten für eine ein- oder mehrstufigen Radialpumpe (oder je nachdem mehrere Pumpen) konnte nicht ausfindig gemacht werden, da es sich dabei nicht um Serienprodukte handelt. Geschätzt werden Kosten von mehreren zehntausend Franken.

Bedenkt man allein die derart hohen Materialkosten der Rohre, scheint eine Umsetzung eines geschlossenen Kreislaufs kaum realistisch.

Sole

Das Volumen der Wasser-/Glykolmischung beträgt beim Rohr 200x11.9 und 47'000 m Länge:

$$V = \pi * {r_i}^2 * L = 1146.04\ m^3$$

Das Mischungsverhältnis beträgt schlimmstenfalls 60 Vol.-%. Dafür wären 687'600 Liter Tyfocor notwendig. Bei einem Preis von CHF 4.75 je Liter sind dies weitere Kosten von CHF 3'257'570.

Auch wenn davon ausgegangen wird, dass aufgrund der hohen Bestellmenge die Preise tiefer ausfallen, scheint eine Investition in einen geschlossenen Primärkreislauf nicht sinnvoll. Die spezifischen Kosten von Rohrmaterial und Sole betragen alleine bereits CHF 81 pro Quadratmeter Seefläche.

8.2 Ersparnis von nicht erneuerbarer Energie

Wenn man die Anlage mit einer Nennleistung von 1 MW während 5 Monaten (ca. 3'600 h) in Betrieb hat, ergibt dies eine Wärmemenge von 3'600 MWh. Spezifisch beträgt dies 44 kWh je Quadratmeter Seefläche. Geht man davon aus, dass damit Ölfeuerungen ersetzt werden, kann man Öl sparen, was als nichterneuerbare Energie gilt.

Heizöl hat einen Heizwert von ungefähr 10 kWh pro Liter. Darauf folgt:

$$V = \frac{3'600'000\ kWh}{10\ kWh/l} = 360'000\ l$$

[6] Preise von Mauderli AG, Schachen/Luzern Stand Mai 2019

Es können 360'000 l Heizöl für die Saison von November bis Ende März eingespart werden.

8.3 Kostenersparnis

Aufgrund dessen, dass der Aufwand bzw. die Investitionskosten über die Gesamtanlage in diesem Stadium nicht abgeschätzt werden können, ist es nicht direkt möglich, von Kostenersparnis zu sprechen. Es kann nur überschlagsmässig gezeigt werden, wie sich Kosten und Nutzen verhalten, wenn man die Hauptkosten der Primärseite mit der Ersparnis von Heizöl vergleicht.

Die spezifische Wärmemenge beträgt gemäss dem vorigen Kapitel 44 kWh/^{2}. Dies ermöglicht eine Einsparung von 4.4 l Heizöl pro Quadratmeter Seefläche pro Saison. Geht man von Heizölkosten von 95 Rp./l aus, betragen die Kosten dafür knapp CHF 4.20 pro Quadratmeter. Da die Wärmeentnahme aus dem See selbst jedoch nicht ohne Aufwendung von zusätzlicher, elektrischer Energie für die Pumpen ist, fällt ein Teil dieses Nutzens weg. Dem gegenüber stehen primärseitige Materialkosten von Sole und Rohren von 80 Fr./m^2.

9. Erkenntnisse

9.1 Technische Umsetzung

Die technische Umsetzung wird in vier Bereiche unterteilt. Zuerst wird das Wärmepotential des Obersees, bzw. die mögliche Wärmeleistung eines Fernwärmenetzes besprochen. Danach wird aufgezeigt, in welchem Zeitraum eine Nutzung möglich und sinnvoll ist. Und schlussendlich erfolgt eine Empfehlung für die Umsetzung des Grobkonzepts und dessen Primärkreislauf.

9.1.1 Wärmeleistung

Gemäss der Eisschicht-Simulation in Kapitel 6 mit einer thermischen Nutzung von 1 MW und 5 MW ist es empfehlenswert, eine Wärmeleistung dazwischen zu wählen. Geht man davon aus, dass die Lebewesen bei einer 2 m dicken Eisschicht keinen Schaden nehmen, wird eine Auslegung der Anlage für 3 MW Wärmeleistung empfohlen. So hat die Anlage auch in Zukunft das Potenzial, genügend dicke Eisschichten aufzubauen und die daraus gewonnene Wärme zu nutzen. Der auf die Wärmepumpe bzw. dessen Verdampfer übertragene Wärmestrom kann über den Volumenstrom geregelt werden. So kann auch auf besonders warme oder kalte Winter und variierender Wärmebedarf der Verbraucher reagiert werden. Auch kann der Eisaufbau stärker vorangetrieben werden, wenn der See für einen Anlass z.B. Anfang Dezember bereits genügend tief zugefroren sein muss.

9.1.2 Nutzungsperiode

In der Eisschicht-Simulation, als auch der Kostenrechnung wurde mit einer Nutzungsperiode von Anfang November bis Ende März gerechnet. Anfang November beginnt einerseits eine Zeitperiode, in welcher praktisch alle Tage Heizgradtage sind. Heizgradtage sind alle Tage, bei welchen durchschnittliche Lufttemperaturen unter 12 °C herrschen und die Heizung eingeschalten werden muss. Andererseits muss dafür gesorgt werden, dass der See nicht unnatürlich früh zufriert. Aufgrund der fehlenden historischen Aufzeichnung der Eisschicht des Obersees wird gemäss den Daten des Eismeisters von 2018 davon ausgegangen, dass der Obersee meist ab Mitte November zu gefrieren beginnt. Ende März wird die thermische Nutzung in der Simulation, als auch der Kostenrechnung beendet, damit die Eisschicht genügend Zeit zum Schmelzen hat, um nicht auch noch im Juni oder Juli Eis auf dem Obersee anzutreffen. Dies würde gänzlich gegen den natürlichen Verlauf verlaufen und sicherlich den Lebewesen Schaden, die im späteren Frühling beginnen, sich fortzupflanzen oder wie die Amphibien möglicherweise abwandern. In der folgenden Abbildung ist ersichtlich, welche Tage des Jahresverlaufs von 01. August 2018 bis 31. Juli 2019 Heizgradtage sind.

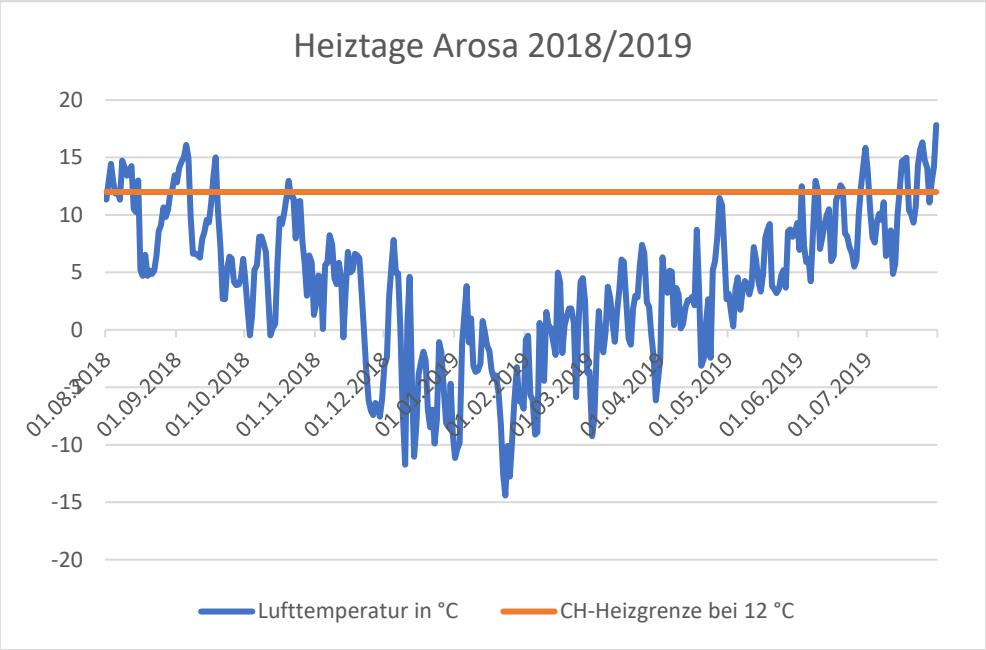


Abbildung 35: Heiztage in Arosa von 01. August 2018 bis 31. Juli 2019 mit einer Heizgrenze von 12 °C

Es ist ersichtlich, dass es bereits einige Heizgradtage vor Anfang November gibt. Wesentlich mehr Heizgradtage sind jedoch noch nach Ende März zu verzeichnen. Empfohlen wird deshalb, dass die thermische Nutzungsperiode maximal von Anfang Oktober bis Ende April dauert. Die Wärmeleistung soll bei Beginn und Ende dieser Zeitperiode möglichst tief gehalten werden und der Situation angepasst werden. Dabei müssen die Parameter Wassertemperatur und die Dicke der Eisschicht ständig überwacht werden, sodass die Eisbildung frühestens Anfang November beginnt und das letzte Eis spätestens Ende Mai geschmolzen ist.

9.1.3 Gesamtkonzept

Als Gesamtkonzept wird Konzept 2 «Dezentrale Temperaturerhöhung» empfohlen. Dies aber nur in Kombination mit dem offenen Primärkreislauf, da das benötigte Solevolumen ansonsten sehr hoch wird. Frostschutzmittel wie Tyfocor ist sehr teuer und kann in einem solchen Fall Kosten von mehreren Millionen Franken verursachen. Durch die dezentrale Temperaturerhöhung bzw. den dezentralen Wärmepumpen spart sich der Betreiber des Fernwärmenetzes eine eigene grosse Anlage, die einerseits viel Platz in der Nähe des Zentrums benötigt und andererseits können die Verbraucher die gewünschte Vorlauftemperatur selbst wählen. Andererseits regeneriert sich der Primärkreislauf auf dem Weg zum Verbraucher sogar. Der Wärmestrom aus der Umgebung zusätzliche Wärme auf, da dessen Temperaturniveau von 0 °C bis 4 °C sehr niedrig ist.

Für die Eisfläche ist es empfehlenswert, dass der Schnee, der darauf fällt, jeweils weggeräumt wird. So wird an Tagen mit negativer Bilanz die Eisbildung gefördert und an Tagen mit positiver Bilanz erfolgt ein Wärmeeintrag in den See, damit wird der Eisspeicher regeneriert.

Für die Verbraucher ist zu empfehlen, dass sie zur Erhöhung der Quellentemperatur der Wärmepumpe eine Anlage in Kombination mit Solarkollektoren verwenden, um die

Jahresarbeitszahl möglichst hoch zu halten. Diese wird im Bereich von 3.7-4 erwartet und befindet sich dabei auf einem ähnlichen Niveau wie eine Erdsonden-Wärmepumpe.

9.1.4 Primärkreislauf

Aus der Arbeit geht hervor, dass eine Umsetzung mittels geschlossenen Kreislaufs (Wärmeübertrager im See), wie es die bekannten Eisspeicher-Anlagen tun, kaum möglich ist. Zum einen aufgrund der hohen Druckverluste und den daraus resultierenden, hohen Förderhöhen der Pumpe (was die Suche nach einer passenden Pumpe schwierig macht). Andererseits sind die Materialkosten für die Rohre und die Sole in einem geschlossenen Primärkreislauf bereits so hoch, dass sie Kosten in Millionenhöhe verursachen. Für das berechnete Beispiel mit dem 200x11.9 Rohr, was die sinnvollsten Betriebsbedingungen aufweist, resultieren Kosten für Rohre und Sole von 3.4 Mio. Franken. Dies entspricht spezifisch CHF 80 pro m^2 Seefläche. Der «Wärmegewinn» von knapp 44 kWh pro m^2 Seefläche (entspricht 4.4 Liter Heizöl) bei einer Nutzungsperiode von 5 Monaten mit einer durchschnittlichen Wärmeleistung von 1 MW vermag diese Kosten nicht kompensieren. Weiter ist der Wärmedurchgang der Wärmeübertrager, egal ob Rohr- oder Platten-Wärmeübertrager sehr schlecht, sobald sie Eis ansetzen. Dies zu vermeiden benötigt beispielsweise Massnahmen wie Enteisung mittels warmer Sole, die durch installierte Solarkollektoren erzielt wird und Zusatzkosten verursacht. Ein wichtiger Faktor ist auch, dass es sowohl bei der Bevölkerung, als auch beim Tourismus kaum durchsetzbar ist, einen Bergsee, der in einer wunderbaren Naturkulisse liegt, mit Technik vollzustopfen. Der Wärmedurchgang vom See zum Solekreislauf benötigt viel Fläche in Form von Rohren oder Platten. Sie beeinflussen die Lebewesen im und am See und auch die Optik des Sees von aussen zwangsläufig negativ. Ganz zu schweigen davon, dass in den Sommermonaten, wo kein Eis ist, im schlimmsten Fall nicht mehr gebadet, getaucht oder gerudert mehr kann.

Deshalb wird empfohlen, einen offenen Primärkreislauf in Betracht zu ziehen. Dieser entnimmt dem See direkt Wasser, führt es in einem Wärmenetz zum Verbraucher und leitet es anschliessend zurück in den See. Dieser Kreislauf benötigt eine wesentlich kleinere, hydraulische Leistung und weist tiefere Investitionskosten auf, da der Wärmeübertrager im See komplett wegfällt. Auch sind die Wasserentnahme und die Wasserrückführung kaum bemerkbar von aussen. Die Wasserentnahme erfolgt aus thermodynamischer Sicht am besten dort, wo die höchste Temperatur zu erwarten ist. Das bedeutet, dass die Entnahmestelle(n) in einer tieferen Schicht erfolgt. Dort ist maximal 4 °C Wassertemperatur zu erwarten. In der Praxis ist es dort wohl wärmer, da der Obersee nicht sehr tief ist. Die Einleitung des abgekühlten Wassers sollte möglichst in der obersten Schicht erfolgen. Wünschenswert für die Eisbildung ist Wasser nahe von 0 °C, aber aufgrund der Gefriergefahr sollte das Wasser beim Verdampfer der Wärmepumpe nur soweit abgekühlt werden, dass es mit genügend Sicherheit nicht gefriert. Aufgrund dessen, dass das Wasser auf dem Weg von der Wärmepumpe zum See unterirdisch leicht regeneriert, sollte es unterwegs nicht spontan gefrieren. Durch das geringere ΔT dieses Kreislaufs ist ein höherer Volumenstrom notwendig als beim geschlossenen Kreislauf. Dies kann bei der Einleitung schlimmstenfalls dazu führen, dass durch die leichte, erzwungene Konvektion der ganze See zu konvergieren beginnt. Damit kann eine totale Durchmischung stattfinden und die stabile Schichtung, die die Eisbildung an der Oberfläche erst ermöglicht, wird zerfallen. Dies ist einerseits gesetzlich verboten, weil es den Lebewesen im See schadet und andererseits entfällt der Mehrfachnutzen der Eisfläche, insofern sie sich nicht oder zu wenig dick ausbilden würde. Wie sich deshalb ein Wärmeentzug des Sees auf diese Weise auf die

gewünschte Eisbildung verhält, muss in einem weiteren Schritt geprüft werden. Die folgende Abbildung zeigt das empfohlene Gesamtkonzept mit dem offenen Primärkreislauf.

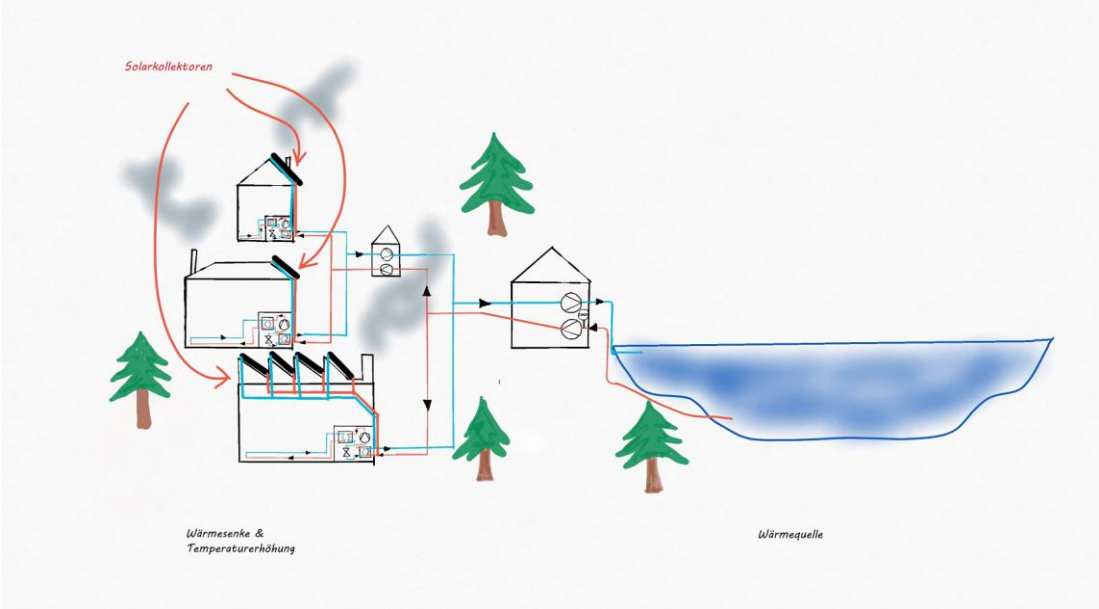


Abbildung 36: Vorschlag zur Umsetzung bzw. nächsten Vorstudie

9.2 Potentielle Wärmekunden

Wie im Kapitel 6.5 erwähnt wurde, sind hohe Vorlauftemperaturen im Tertiärkreislauf zu vermeiden. Ein solch grosser Eisspeicher, wie es der Obersee darstellt, ist zwar tendenziell toleranter für höhere Vorlauftemperaturen, da die Quellentemperatur nur wenig absinkt, dies ist aber aus Gründen der Effizienz trotzdem zu vermeiden. Das bedeutet, dass eine Nutzung im Niedertemperaturbereich ideal ist. Dabei handelt es sich zum Beispiel um Raumheizungen oder Wasserheizungen von Hallenbädern und nicht um Brauchwarmwasser, das wesentlich höhere Vorlauftemperaturen benötigt. Weiter muss beachtet werden, dass die Nutzungsperiode und die Wärmeentnahme des Obersees nicht willkürlich wählbar sind. Es handelt sich beim Obersee um einen Naturspeicher, bei welchem Rücksicht auf die darin lebenden Lebewesen genommen werden muss. Das bedeutet auch, dass diese Wärmequelle nicht dafür geeignet ist, Wärme auf Abruf zu bekommen. Auch in kalten Perioden und vor allem dann, ist die Wärmeentnahme nicht unbegrenzt erhöh bar. Änderungen der Wärmeentnahme sind stets in Anbetracht der Parameter wie Wassertemperatur und Eisdicke zu regulieren. Deshalb eignen sich vor allem Wärmekunden, bzw. Verbraucher, die diese Wärmequelle nicht als alleinige Heizung einsetzen, sondern eine Art Grundwärme benötigen und den Rest mit einer zusätzlichen Heizung ausgleichen. Dies wäre zum Beispiel bei Schwimmbädern der Fall, die ein grosses Wasservolumen aufwärmen wollen. Oder grössere, öffentliche Anlagen wie Turnhallen, Sportstadien oder Bahnhöfe (wenn es Bereiche gibt, die beheizt sind). Auch Firmen mit grossen Fabrikhallen sind möglich. Da Arosa kein öffentliches Hallenbad besitzt, kommen einzig die verschiedenen Hotels in Frage, die entweder grosse Räume haben, die beheizt werden müssen und/oder eigene Schwimmbecken haben. Ein weiterer, möglicher Kunde ist die Eishockey- bzw. Sportarena Arosa. Grössere Industriegebiete in Arosa gibt es leider nicht, weshalb ein solcher Kunde wohl wegfällt. Um den Wärmebedarf möglicher Wärmekunden abzuklären, muss in einem nächsten Schritt den Kontakt mit ihnen gesucht werden. Auch ist zu klären, wie die potenziellen Kunden dazu stehen, eigene Wärmepumpen zu installieren.

Dies benötigt einerseits Platz und andererseits muss der Kunde dafür selbst Geld investieren. Wie im Kapitel Wärmepumpe genannt, ist der Einsatz von parallelen Sonnenkollektoren sehr zu empfehlen, weshalb auch dieser Punkt abgeklärt werden muss.

9.3 Aufwand & Nutzen

Wie bereits zu Beginn der Arbeit erwähnt, steht der Mehrfachnutzen bei diesem Projekt im Vordergrund. Einerseits gibt es einen Nutzen aus Sicht der (Heiz-)Energie und andererseits ist die Eisfläche auf dem Obersee auch für verschiedenste Aktivitäten, die von der Bevölkerung und den Touristen getätigt werden, nutzbar. Je nach Nutzen des Projekts ist die Gemeinde und/oder Betreiber des Fernwärmenetzwerkes bereit, einen bestimmten Aufwand (in Form von Geld, Platz, Zeit, etc.) für dieses Projekt auf sich zu nehmen. Für die Umsetzung des Projekts ist es deshalb entscheidend, den Aufwand und den Nutzen genau zu analysieren und für die unterschiedlichen Parteien zu beziffern. Nur dann kann das Verhältnis zwischen Aufwand und Nutzen abgewogen werden. Ein Projekt muss nämlich mehr Nutzen als Aufwand haben, ansonsten gibt es keinen Anreiz, es umzusetzen. Im Folgenden wird auf diese Aspekte eingegangen.

9.3.1 Nutzen

Der gewünschte Mehrfachnutzen wird in den Bereich «Tourismus, Bevölkerung und Gemeinde» und «Heizenergie» eingeteilt.

Tourismus, Bevölkerung und Gemeinde

Der Nutzen für die Gemeinde, die Bevölkerung und den Tourismus in Zahlen ist schwer abzuschätzen. Es sind unter anderem keine Zusammenhänge zwischen Aufenthalten von Touristen und dem Obersee bekannt. Oder spezifischer zum Beispiel, wie viele Aufenthalte jeweils durch ein Pferderennen entstehen oder dadurch, dass Leute extra aufgrund des gefrorenen Obersees nach Arosa kommen. Um den direkten Einfluss des Obersees auf den Tourismus zu erfassen, müssen Umfragen gemacht werden. So kann auch ermittelt werden, wie der Zusammenhang aktuell aussieht und ob es vermehrtes Interesse an Aufenthalten gibt, falls das Angebot von Arosa im Bereich Nutzung der Eisfläche erhöht wird. Dann muss die Gemeinde auch abschätzen, welche Vorteile sie durch ein erhöhtes Touristenaufkommen hat. Dies sind einerseits Geldeinnahmen aus Steuern der davon profitierenden Unternehmen wie Hotels und Restaurants. Andererseits erhöht sich auch der Wert des Standorts Arosa. Investoren sind bereit, mehr Geld in Projekte in Arosa zu investieren und die Tourismusbranche in Arosa dadurch langfristig zu stärken bzw. aufrecht zu erhalten. Aufgrund dessen, dass die Tourismusbranche das wichtigste Standbein von Arosa ist, ist es für die Gemeinde Arosa zwingend, diese Sparte im Auge zu behalten. Dazu gehört auch, dass überlegt wird, wie das Angebot für Touristen in Zukunft aussieht und in entsprechende Projekte zu investieren. Aufgrund des klimatischen Trends müssen alle Berggebiete in den Alpen ihr Tourismuskonzept überarbeiten. Schneesicherheit für die Skigebiete ist langfristig nicht mehr gegeben. Alternativen sind gefragt. Langfristig die Eisfläche des Obersees sicherstellen zu können, würde den Standort Arosa einzigartig machen. Dieses Naturspektakel von gefrorenen Seen, die zur Betretung für die Bevölkerung freigegeben sind, wird definitiv seltener und möglicherweise im Alpenraum bald nicht mehr möglich. Der

gefrorene Obersee könnte damit zum Wahrzeichen Arosas und europaweit bekannt werden. Verschiedene Anlässe wie Pferderennen, Eishockey-Matches oder Eiskunstlauf-Aufführungen oder Angebote wie Schlittschuhlaufen, Spazieren und Langlaufen auf der Eisfläche würden Touristen nach Arosa führen. Davon profitieren nicht nur die Touristen, sondern auch die Bevölkerung von Arosa.

Nicht zuletzt wird dem klimatischen Trend, dass die Wassertemperatur in Zukunft steigt, durch den Wärmeentzug entgegengewirkt. Das (Öko-)System Obersee wird auch in Zukunft in dessen Artenvielfalt bestehen können.

Heizenergie

Nutzen durch die zur Verfügung gestellte Wärme hat einerseits der Betreiber des Fernwärmenetzwerkes in Form von laufenden (Geld-)Einnahmen. Denn die Wärme ist für den Verbraucher nicht gratis, sondern kostet entsprechend der «verbrauchten» Wärme. Nutzen besteht jedoch auch für die Wärmekunden, die diese Wärme beziehen oder beispielsweise für die umgebene Bevölkerung, die ansonsten durch alternative Heizmethoden wie Ölfeuerungen durch dessen Emissionen belastet wird.

Wenn die Anlage gemäss Empfehlung für eine Nennleistung von 3 MW ausgelegt wird, ist eine Wärmemenge von 10'800 kWh möglich, wenn die Anlage während 5 Monaten mit Volllast betrieben wird. Dies wird aber sicherlich zu Beginn nicht vollständig ausschöpfbar sein, da Rücksicht auf den Obersee und die darin lebenden Lebewesen genommen werden muss. Die spezifische Wärmemenge beträgt 132 kWh je Quadratmeter Seefläche. Geht man davon aus, dass damit Ölfeuerungen ersetzt werden, entspricht dies saisonal 13.2 Liter Heizöl pro Quadratmeter Seefläche. Die Wärmeentnahme aus dem See selbst benötigt jedoch zusätzliche, elektrische Energie für die Pumpen. Und zur Erhöhung der Temperatur auf das gewünschte Temperaturniveau des Tertiärkreislaufs (sprich Vorlauftemperatur), muss ebenfalls noch einmal elektrische Energie zur Betreibung des Verdichters der Wärmepumpe eingesetzt werden.

Wie in Kapitel 9.2 bereits beschrieben, können Hotels oder grössere, öffentliche Einrichtungen wie die Eishockey-Arena oder Schulhäuser mit Turnhallen von der Wärme profitieren. Die Kunden profitieren einerseits von der nachhaltigen Energiequelle, was in Zukunft durch die Klimaerwärmung eine immer wichtigere Rolle für die Reputation ihres Betriebes und damit dessen Wirtschaftlichkeit spielt. Andererseits können die Kunden an Platz und Zeit sparen. Die Wärmepumpe in ihrem Betrieb benötigt nur einen kleinen Raum und die Zufuhr von Primärenergie wie Holz oder Heizöl entfällt komplett. Dieses muss normalerweise im Gebäude gelagert und regelmässig aufgefüllt werden. Wie sich die Kosten pro kWh Wärme entwickeln, hängt zum einen von der Umsetzung des Projekts ab (Höhe der Investitionen). Zum anderen auch, wie weit weg sich die Verbraucher von der Wärmequelle befinden. Dies muss in einem nächsten Schritt geprüft werden.

9.3.2 Aufwand

Betreiber des Fernwärmenetzwerkes

Für den Betreiber des Fernwärmenetzwerkes entstehen primär Investitionen in Folge von Kapitaleinlagen. Diese betragen je nach Umsetzung mehrere Millionen Franken. Sieht man die Kostenrechnung in Kapitel 8, so belaufen sich für einen geschlossenen Primärkreislauf allein die Materialkosten für die Rohre und Sole der sinnvollsten, technischen Umsetzung auf

rund 3.4 Mio. Franken. Wichtige Hauptkomponenten wie die Pumpen (sowohl für Primär-, als auch Sekundärkreislauf), Gestänge des Wärmeübertragers im See, Rohre für das Wärmeverteilungsnetz, sowie Verbraucheranschlüsse sind noch gar nicht einberechnet. Zu den Investitionskosten kommen noch weitere Projektkosten für Planung und Bau dazu. Die Investitionskosten für einen offenen Kreislauf sind sicherlich wesentlich tiefer, aber können in dieser Arbeit nicht beziffert werden. Dies gilt es in einem nächsten Schritt abzuklären.

Ist die Anlage gebaut, erfolgen jährliche Zusatzkosten in Form von Wartung, Eisbearbeitung, usw. Die Anlage selbst benötigt als Betriebsenergie elektrische Energie, die entweder vom öffentlichen Netz eingekauft wird und/oder (teilweise) durch eigene PV-Anlagen zur Verfügung gestellt wird.

Bevölkerung

Die Bevölkerung von Arosa muss hauptsächlich mit dem ganzen Projekt einverstanden sein, insofern die Umsetzung auf öffentlichem Grund erfolgt und/oder es gegebenenfalls durch die Gemeinde (teil-)finanziert wird. Bei einer (Teil-)Finanzierung bezahlen die Einwohnerinnen und Einwohner von Arosa, sowie die dort ansässigen Firmen indirekt über die Steuern dafür. Auch wird der Bau zu einigen Beeinträchtigungen im Verkehr führen oder durch Lärm verursachen. Falls die Rohre des Fernwärmenetzwerkes durch private Grundstücke verlaufen, müssen deren Eigentümer einwilligen.

Gemeinde

Je nachdem, ob die Gemeinde als Betreiber des Fernwärmenetzwerkes auftritt oder nicht, trägt sie die Kosten dafür vollständig oder bei einer Subvention zumindest teilweise. Die Gemeinde muss zusätzlich öffentlicher Raum zur Verfügung stellen. Dies betrifft zum Beispiel Böden, wo unterirdische Leitungen verlegt werden oder kleinere Gebäude für die Pumpwerke errichtet werden.

Wärmekunden/Verbraucher

Der Aufwand der Wärmekunden auf baulicher Seite ist, dass eine eigene Wärmepumpe im Gebäude und gemäss Empfehlung Solarkollektoren auf dem Dach installiert werden müssen. Für Wärmepumpe und Solarkollektoren sind je nach Wärmebedarf Kosten im Bereich von mehreren Zehntausend Franken bis wenige hunderttausend Franken nötig. Ist kein passender Tertiärkreislauf vorhanden, muss zusätzlich einer gebaut werden. Aus finanzieller Sicht fallen zusätzlich variable Kosten an. Diese betreffen die benötigte, elektrische Energie des Verdichters und den Einkauf der Wärme aus dem Netz. Auch muss die Anlage auf eigene Kosten gewartet werden.

10. Zusammenfassung und Ausblick

10.1 Zusammenfassung

Der Obersee hat ein Wärmepotenzial von ungefähr 3 MW und ist für eine Niedertemperatur-Anwendung geeignet. Mit der thermischen Nutzung kann auch in Zukunft, sicherlich bis Ende des Jahrhunderts, eine begehfähige Eisschicht sichergestellt werden. Die Erkenntnisse aus Kapitel 9 zeigen, dass eine Umsetzung eines geschlossenen Primärkreislaufs auf praktisch allen Ebenen nicht realistisch ist. Das bedeutet aber nicht zwangsläufig, dass die Idee eines offenen Latent-Wärmespeicher unmöglich ist. Es ist auf konventionellem Weg, wie es bisherige Eisspeicher-Anlagen tun, nicht möglich. Um die technische Umsetzung mittels offenem Primärkreislauf abschätzen zu können, ist eine weitere Vorstudie auf Basis dieser Erkenntnisse nötig. Der geplante Ablauf der nächsten Vorstudie ist im nächsten Kapitel beschrieben.

10.2 Ausblick

In einem nächsten Schritt geht es vor allem darum, zu überprüfen, inwiefern ein offener Primärkreislauf realisierbar ist. Dies erfolgt in einer Vorstudie mit folgenden Schritten:

1. Verbesserung der Simulation

   Um die Simulation noch realistischer zu gestalten und die Auswirkung der thermischen Nutzung auf die Eisdicke, Wassertemperatur, etc. genauer zu sehen, muss sie angepasst werden. Einerseits betrifft es den Wärmedurchgang durch die Schneedecke, die momentan als Isolator gilt. Andererseits sollen die Terme der Konvektion und Verdampfung mittels Gradientenmethode genauer bestimmt werden, da sie in der Simulation jeweils mit der Annahme berechnet werden, dass Advektionsbedingungen herrschen[7]. Für die Gradientenmethode ist bereits ein Vorschlag zur Umsetzung in einem Dokument im Anhang zu finden. Die aktuell vorhandene Bewölkung kann aus den CH2018-Daten mittels Parametrisierung angenähert werden. Auch dazu findet sich bereits ein Vorschlag im Anhang.

2. Verlauf der Eisbildung mit einem offenen Primärkreislauf

   Da es unklar ist, wie sich die Einleitung des Wassers im See in der obersten Schicht auf die Eisbildung verhält, muss dies mittels kleiner Versuchsmodelle und/oder Strömungssimulationen überprüft werden. Ist die Eintrittsgeschwindigkeit des Wassers in den See zu gross, wird befürchtet, dass dies zu einer starken Konvektion des Sees führt, die wiederum die natürliche Schichtung zerstört. Aufgrund dessen, dass die natürliche Eisbildung an der Oberfläche nur durch die natürliche Schichtung ermöglicht wird, würde eine Eisbildung schwierig. Deshalb muss man sich über die technische Umsetzung der Einleitung Gedanken machen und möglicherweise mehrere Einlass-Prototypen prüfen.

[7] Advektionsbedingungen zeichnen sich durch hohe Windgeschwindigkeit, mittlere bis hohe Lufttemperaturen, hohen Wasserdampfdruck und starken Regen aus und der Schnee befindet sich dadurch in einem Schmelzprozess.

3. Wärmebedarf

   Um die Grösse der benötigten Anlage abschätzen zu können, müssen potenzielle Kunden angefragt und deren Bedarf ermittelt werden. Dies kann dann mit dem bereits abgeschätzten Wärmepotenzial des Obersees dieser Arbeit verglichen werden.

4. Investitionskosten

   Die Investitionskosten sollen auf Grundlage der Kosten und Erkenntnisse von anderen Anlagen mit thermischer Nutzung von Seen (im sensiblen Bereich) abgeschätzt werden. Dazu wird in einer ersten Phase davon ausgegangen, dass die Anlage des Obersees bis auf die Einleitung und das grössere ΔT mit den anderen Anlagen bezüglich technischer Umsetzung übereinstimmt. Das Fernwärmenetzwerk kann gemäss «Planungshandbuch Fernwärme» der Arbeitsgruppe QM Fernwärme geplant werden.

5. Einschätzung von Fachpersonen

   Um den Einfluss der Eisdicke auf die Lebewesen im Obersee abschätzen können, muss der Kontakt mit Fachpersonen (Biologen, Zoologen, etc.) gesucht werden. So kann bestimmt werden, ob eine Eisdicke von 2 m oder mehr umsetzbar sind. Auch muss abgeklärt werden, wie Mikroorganismen auf eine plötzliche Abkühlung von bis zu 4 °C reagieren, insofern sie in den Primärkreislauf geraten.

6. Gesetzliche Bestimmungen

   Aufgrund dessen, dass die Gewässerschutzvorschrift sehr lasch formuliert ist, muss mit den zuständigen Behörden abgeklärt werden, ob eine solche Anlage gesetzlich konform ist. Dies spielt vor allem dann eine Rolle, wenn die natürliche Schichtung zerstört würde.

Sobald diese Schritte abgearbeitet sind, kann eine endgültige Schlussfolgerung gemacht werden, ob die Idee des offenen Latent-Wärmespeicher im Obersee realisierbar ist und wenn ja, unter welchen Bedingungen.

11. Literatur

[AWEL, 2019], Baudirektion AWEL, "Vorgänge im See", www.awel.zh.ch, 2019

[BFE, 2014], Bundesamt für Energie, "Eisspeicher-Wärmepumpen-Anlagen mit Sonnenkollektoren. Technologiestudie.", Weisskopf Partner GmbH, Zürich, 2014

[BFE, 2015], Bundesamt für Energie, "High-Ice – System development for high solar thermal gains with ice storage and heat pump", SPF Institut für Solartechnik, Hochschule für Technik Rapperswil, 2015

[BFE, 2017], Bundesamt für Energie, "Planungshandbuch Fernwärme", Arbeitsgemeinschaft QM Fernwärme, 2017

[Böswirth und Bschorer, 2014] Böswirth, L. und Bschorer, S., "Technische Strömungslehre", Springer Vieweg, Wiesbaden, 2014

[Braitmeier, 2003], Braitmeier, M., "Die Energiebilanz an der Oberfläche des Nevado Santa Isabel, Kolumbien", Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf, 2003

[Brennwald, 2012], Brennwald, M., "Hydrosphäre", Skript «Physik aquatischer Systeme», Kapitel 2, 2012

[Eawag, 1981], Eawag, "Wärmepumpen an Oberflächengewässern", Dübendorf, 1981

[Gaudard, 2016 (1)], Gaudard, A., "Wärme- und Kältenutzung aus Brienzer-, Thuner und Bielersee. Abschätzung des Potenzials und Beeinflussung der Seeökosysteme", Eawag, Kastanienbaum, 2016

[Gaudard, 2016 (2)], Gaudard, A., "Wärme- und Kältenutzung aus Sempacher- und Baldeggersee. Abschätzung des Potenzials.", Eawag, Kastanienbaum, 2016

[Konstantin, 2018], Konstantin, P., "Praxisbuch der Fernwärmeversorgung", Springer Vieweg, Wiesbaden, 2018

[Maniak, 2015], Maniak, U., "Hydrologie und Wasserwirtschaft. Eine Einführung für Ingenieure.", Springer Vieweg, Wiesbaden, 2015

[NCCS, 2018], National Centre for Climate Services, "CH2018 -Klimaszenarien für die Schweiz ", Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz, ETH Zürich, 2018

[NCCS, 2019], National Centre for Climate Services, "Klimawandel und Auswirkungen", www.nccs.admin.ch, 2019

[Philippen et al., 2012b] Philippen, D., Logie, W., Thalmann, M., Haller, M. Y., Brunold, S., und Frank, E., "Development of a heat exchanger that can be de-iced fort he use in ice stores in solar thermal heat pump systems", EuroSun2012, ISES-Europe Solar Conference, Rijeka, Kroatien, 18.-20. September 2012

[topmotors.ch, 2012], topmotors.ch, "Merkblatt 23. Pumpen.", Schweizerische Agentur für Energieeffizienz, 2012

[TYFOROP Chemie, 2019] TYFOROP Chemie GmbH, "Technische Information TYFOCOR L", www.tyfo.de, 2019

[VDI-Gesellschaft, 2013], VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, "VDI Wärmeatlas", Springer Vieweg, Wiesbaden, 2013

[Viessmann, 2013] Viessmann AG, "Eisspeichersystem für Wärmepumpen, Planungsanleitung", www.viessmann.de, 2013

[Viessmann, 2019] Viessmann AG, "Datenblatt Vitocal 300-G/350-G", www.viessmann.de, 2019

[Wikipedia, 2019], Wikipedia, "Obersee (Arosa)", www.wikipedia.org, 2019

[Wischhusen, 2016], Wischhusen, S., "Dynamische Simulation zur wirtschaftlichen Bewertung von komplexen Energiesystemen", Cuvillier Verlag, Göttingen, 2016

12. Anhang

Der Anhang wird digital mit einem USB Stick abgegeben.