



# Master Thesis

eingereicht von  
Sascha Niemann

Matrikelnummer 763410



Universität Potsdam

Institut für Erd- und Umweltwissenschaften  
Studiengang Geoökologie

Ansprechperson Prof. Dr. Axel Bronstert



Alfred-Wegener-Institut

Helmholtz Zentrum für Polar- und Meerforschung  
Forschungsstelle Potsdam

Ansprechperson PD Dr. Julia Boike

Berlin, 27.11.2014



# **Seewasserbilanz eines Thermokarstsees im Lena Delta, Nord-Sibirien**

"Дети Бога, мы не должны бороться землю  
один. Он будет мстить за своих ран, и они  
останутся победитель! "

Maxim Gorki (1868 – 1936)





## Danksagung

Für eine sehr gute Unterstützung beim Anfertigen dieser Arbeit möchte ich mich ganz besonders bei PD Dr. Julia Boike bedanken. Sie stand mir stets zu Seite, konnte mir mit einer umfassenden Kompetenz fachlich sehr gut weiterhelfen und war auch menschlich eine tolle Anführerin bei SPARC, unserer Arbeitsgruppe beim Alfred-Wegener-Institut in Potsdam. Ein weiterer Dank geht an Prof. Dr. Axel Bronstert von der Universität Potsdam. Ihm gelang es bestens mich immerfort zu ermutigen und so den Fortgang dieser Arbeit zu beschleunigen.

Tausend Dank möchte ich auch dem Alfred-Wegener-Institut aussprechen. Das Institut ermöglichte es mir einen zweimonatigen Expeditionsaufenthalt im Lena Delta durchzuführen und betreute mich dabei jederzeit in allen Belangen. Nur durch das angenehme Arbeitsklima und die bemerkenswerte Zusammenarbeit der Kollegen war es mir möglich Planung, Durchführung und Auswertung dieser Expedition zu realisieren. Hier seien besonders Waldemar Schneider und Günter Stoof erwähnt, welche stets bemüht waren einen reibungslosen Expeditionsablauf zu garantieren. Weiterhin bedanke ich mich bei allen Expeditionsteilnehmern, hier besonders Familie Bornemann namentlich Antje Eulenburg, Sofia Antonova, Anne Morgenstern, Samuel Stettner und Niko Bornemann sowie Dr. Birgit Heim und Elin Högström. Weiterhin danke ich der Besatzung der Forschungsstation und sämtlichen neu gewonnenen Freunden. Ihr alle habt die Zeit im Lena Delta für mich zu einem unvergesslichen Erlebnis gemacht.

Mein herzlichster Dank geht an meine Freundin, sie war und ist mir ein starker Rückhalt und belebt mich mit ihrer besonderen Art. Danke Mari!

Natürlich seien auch meine Familie und meine Freunde erwähnt, welche mir mit viel Motivation und entspannten Stunden die nötige Kraft gaben, diese Arbeit zu beenden. Vielen Dank dafür.



# Inhaltsverzeichnis

ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	I
TABELLENVERZEICHNIS .....	IV
I. EINLEITUNG .....	- 1 -
II. HINTERGRUND .....	- 4 -
DAS LENA DELTA.....	- 4 -
KLIMA .....	- 5 -
VEGETATION .....	- 5 -
GEOLOGIE UND GEOMORPHOLOGIE.....	- 7 -
HYDROLOGISCHE BESONDERHEITEN .....	- 9 -
DAS UNTERSUCHUNGSGEBIET .....	- 11 -
III. METHODIK.....	- 13 -
GRUNDLAGE.....	- 14 -
MESSUNG DES NIEDERSCHLAGES .....	- 15 -
BESTIMMUNG DES ZUFLUSSES .....	- 17 -
SUPRAPERMAFROSTWASSER-UNTERSUCHUNG .....	- 18 -
ERMITTLUNG DER WASSERSTANDSÄNDERUNG .....	- 21 -
VERDUNSTUNGSBESTIMMUNG.....	- 21 -
ABFLUSSMESSUNG .....	- 24 -
ZUSAMMENFASSUNG.....	- 27 -

IV. ERGEBNISSE .....	- 29 -
NIEDERSCHLAG .....	- 29 -
ZUFLUSS.....	- 31 -
SUPRAPERMAFROSTWASSER .....	- 33 -
VERDUNSTUNG.....	- 37 -
ABFLUSS.....	- 40 -
SEESPEICHER .....	- 41 -
ZUSAMMENFASSUNG.....	- 42 -
V. DISKUSSION .....	- 47 -
NIEDERSCHLAG .....	- 47 -
ZUFLUSS.....	- 49 -
VERDUNSTUNG.....	- 50 -
ABFLUSS.....	- 53 -
VI. ZUSAMMENFASSUNG.....	- 54 -
VII. FOLGERUNG.....	- 58 -
LITERATURVERZEICHNIS.....	- 60 -

## Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1: Tundratypen im Untersuchungsgebiet; links Moos- und Flechten-, rechts Zwergstrauchtundra..... - 6 -
- Abbildung 2: Darstellung eines Küstenverlaufes einer Insel im südlichen Lena Delta; fortschreitender Thermokarst ist sowohl am Uferstreifen als auch an den wieder gefüllten Senken auf der Flussterrasse zu erkennen ..... - 7 -
- Abbildung 3: Darstellung der Permafrostverteilung auf der nördlichen Erdhalbkugel (Brown et al., 1997) ..... - 10 -
- Abbildung 4: Darstellung der Lage der Insel Kurungnakh im Süden des Lena Deltas (Morgenstern et al., 2012) ..... - 11 -
- Abbildung 5: Darstellung des Untersuchungsgebietes auf Kurungnakh: Thermokarstsee "Lucky Lake" ..... - 12 -
- Abbildung 6: Darstellung einiger Besonderheiten des Thermokarstsees "Lucky Lake"; a) und d) zeigen die steilen Hänge, welche durch Thermokarst beeinflusst und teilweise von Gräsern und kleinen Sträuchern bewachsen sind; b) (Gerinne I) und d) (Zustrom) zeigen oberflächliche Zuläufe ..... - 13 -
- Abbildung 7: leicht veränderte Darstellung der Seewasserbilanzierung nach Nicholson et al. (2000); Inputparameter: Niederschlag, Zufluss über oberflächliche sowie unterirdische Transportwege und diffusen Eintrag; Outputparameter: Verdunstung und oberflächlicher Abfluss ..... - 15 -
- Abbildung 8: Darstellung des Niederschlagsmessers; über einen Zulauf gelangt der gesammelte Niederschlag in die Messwippe ..... - 16 -

Abbildung 9: Darstellung einer Suprapermafrostwasser-Messstelle; Drucksensoren messen den Wasserspiegel im Pegelrohr .....	- 19 -
Abbildung 10: Darstellung einer schematischen Draufsicht des im Ablauf installierten Wehres.....	- 24 -
Abbildung 11: Darstellung des Wehres im Ablauf des Thermokarstsees; Wehreinlauf: Aufsatz mit fest installiertem Radar-Höhensensor; linke Bildhälfte: Solarpanel und Schutzkiste für Elektronik .....	- 26 -
Abbildung 12: Darstellung der Messstationen im Untersuchungsgebiet des Thermokarstsees.....	- 28 -
Abbildung 13: Darstellung des Niederschlages im Untersuchungsgebiet für die vollständige Messperiode.....	- 30 -
Abbildung 14: Darstellung des direkten Wassereintrages in den Thermokarstsee; Zustrom (linke y-Achse), Gerinne I und II (rechte y-Achse), Markierung x- Achse: Messtage.....	- 32 -
Abbildung 15: Darstellung der Eingangsgrößen zur Verdunstungbestimmung; Temperatur und Luftfeuchtigkeit.....	- 37 -
Abbildung 16: Darstellung der Verdunstungsraten während der Messperiode und der entsprechenden Niederschlagsentwicklung .....	- 39 -
Abbildung 17: Darstellung der mit dem Radar-Höhensensor gemessenen Abflussraten und der entsprechenden Niederschlagsentwicklung .....	- 40 -
Abbildung 18: Darstellung der Seespeicheränderung während der Messperiode und der entsprechenden Niederschlagsentwicklung .....	- 41 -
Abbildung 19: Darstellung aller ermittelten In- und Outputparameter der Seewasserbilanz sowie der Wasserstandsänderung im See .....	- 42 -

### III

- Abbildung 20: Darstellung des Wasserlevels im Thermokarstsee während der Messperiode; hellgrün: gemessener Seespeicher, dunkelgrün: berechneter Seespeicher, blau: kumulierter Eintrag, rot: kumulierter Austrag..... - 45 -
- Abbildung 21: Darstellung der Niederschlagswerte mit 20 %-iger Messungenauigkeit ..... - 48 -
- Abbildung 22: Darstellung der Verdunstungsentwicklung im Untersuchungsgebiet mit unterschiedlichen Rauigkeitsfaktoren ..... - 51 -

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der Messkampagne im Untersuchungsgebiet .....	- 27 -
Tabelle 2: gemessene Bodenfeuchten* im Untersuchungsgebiet vor dem Regenereignis am 18.08. ....	- 33 -
Tabelle 3: Darstellung der Auftautiefen im Untersuchungsgebiet, Messzeitraum 14.07. - 26.08. ....	- 34 -
Tabelle 4: Potenzielle Beiträge an einem Suprapermafrostwasser-Eintrag in den Thermokarssee .....	- 36 -
Tabelle 5: Ergebnisse der Messkampagne vom 27.07. - 26.08., Input- und Outputmengen in totalen Zahlen .....	- 44 -
Tabelle 6: Gegenüberstellung verschiedener Oberflächenstrukturen und ihrer entsprechenden Rauigkeitswerte (Zeller, 1981) .....	- 50 -

## I. Einleitung

Der gegenwärtige Klimawandel wird nachhaltig die Umwelt verändern. Messungen der letzten 50 Jahre zeigen, dass die globale mittlere Jahrestemperatur bereits um 1 - 2° C angestiegen ist (ACIA, 2004). Die ersten Auswirkungen dieser Temperaturerhöhung sind bereits deutlich spürbar. So verloren die Gletscher in den Alpen seit Beginn der industriellen Revolution im 19. Jahrhundert mehr als die Hälfte ihrer Gesamtmasse (Paul et al., 2004). Auch die Gletscher des Kilimandscharo sind vom Klimawandel betroffen, sie haben einen derart hohen Eisverlust pro Jahr, dass sie bis zum Jahr 2020 komplett verschwunden sein könnten (Thompson et al., 2002). Weiterhin konnte mittels einer Analyse von Satellitenbildern festgestellt werden, dass an den großen Eisschilden Grönlands ebenfalls sichtbare Veränderungen zu verzeichnen sind. Die Untersuchungen zeigen, dass sich die Auftaufläche der Eisschilde zwischen den Jahren 1979 bis 2005 um ein Viertel vergrößert hat (Correll et al., 2004). Viele weitere Veränderungen, wie eine steigende Anzahl von Wetterextremen mit Starkregenereignissen auf der einen und Wassermangel auf der anderen Seite, ein auf Grund der schmelzenden Eismassen steigender Meeresspiegel, Änderungen der Meeresströmungen sowie negative Auswirkungen auf Ökosysteme, können jede für sich schon große Probleme auslösen. Kombiniert können diese Auswirkungen zusätzlich zu möglichen Verlusten in der Landwirtschaft und damit zu Engpässen in der Versorgungssicherheit führen, Armut, Migration oder Kriege könnten die Folgen sein (Parry et al., 2004).

In arktischen Regionen konnte sogar ein Anstieg der mittleren Jahrestemperatur von bis zu 4 ° C nachgewiesen werden (ACIA, 2004). Am Nordpol ist das arktische Meereis davon direkt betroffen. In einem Zeitraum von nur 33 Jahren ging nahezu ein Viertel der Fläche verloren (NSIDC, 2014). Permafrost, welcher weite Teile der terrestrischen Arktis mit einer Mächtigkeit von bis zu 1500 m unterlagert, kann auf Grund dieser Temperaturerhöhung tauen und dabei unter anderem umfassende Veränderungen in der Geomorphologie auslösen.

Darüber hinaus sind in den Permafrostgebieten dieser Erde etwa 50 % des im Boden gespeicherten organischen Kohlenstoffes gebunden und durch die niedrigen Temperaturen vor mikrobieller Zersetzung geschützt (Zimov et al., 2006).

Taut der Permafrost weiter, können durch einsetzende Mineralisationsprozesse erhebliche Mengen an Treibhausgasen wie Kohlendioxid und Methan freigesetzt werden, was einen positiven Rückkopplungseffekt auf das Klimasystem haben kann.

Auch die Hydrologie der arktischen Regionen ist von im Untergrund anstehendem Permafrost beeinflusst. Sämtliche laterale Wasserbewegungen im Boden und damit auch die Verlagerung von im Wasser gelöster Stoffe sind auf eine in den Sommermonaten auftauende Oberflächenschicht im Boden beschränkt (French, 2007). Die Mächtigkeit dieses Auftauhorizontes, oder active layer, bestimmt darüber hinaus die Infiltrationskapazität des Bodens und hat somit entscheidenden Einfluss auf ökologische Systeme in der arktischen Tundra. Für den Fortbestand ausgedehnter Feuchtgebiete in Alaska sowie in arktischen Gebieten Kanadas und Russlands sind stabile Wasserverhältnisse extrem wichtig (Tarnocai et al., 1988; Hall et al., 1994; Selkregg, 1975, Zhulidov et al., 1997). Durch ein fortschreitendes Tauen des Permafrostes könnten sowohl diese Feuchtgebiete, aber auch komplette Seen, die den Permafrost im Untergrund als Wasserstauer nutzen, versickern.

Für einen Großteil dieser Veränderungen müssen etwaige Gefahren, sowohl für das Ökosystem Erde als auch für dessen Bevölkerung, identifiziert und gegebenenfalls Anpassungsstrategien entwickelt werden. Um notwendige Investitionskosten möglichst gering halten zu können, werden für die Ermittlung der Auswirkungen des Klimawandels Modelle genutzt, welche basierend auf gemessenen Daten, aktuelle Prozesse umfassend und realistisch wiedergeben. Verändert man die Eingangsparameter der Modelle, ist es möglich, zukünftige Prozesse abzubilden. Allerdings sind Ökosysteme überaus vielfältig und hoch komplex. So ist der Nachweis von Veränderungen, das Zurückführen auf eine Ursache oder die Vorhersage künftiger Entwicklungen in Ökosystemen besonders schwierig. Eine gute Datengrundlage ist dabei für eine erfolgreiche Modellierung entscheidend.

Diese Abschlussarbeit stellt eine Prozessstudie dar, welche als Basis für eine anschließende hydrologische Modellierung genutzt wird. Untersuchungsgegenstand ist ein durch Thermokarstprozesse entstandener See auf der Insel Kurungnakh im Lena Delta, Sibirien. Für diesen Thermokarstsee soll eine Wasserbilanz nach Nicholson et al. (2000) erstellt werden. Hierzu sollen mit Hilfe verschiedener Messungen und anschließender Auswertung der aufgenommenen Daten untersucht werden, welche quantitative Bedeutung die verschiedenen Ein- und Ausgangsparameter der Bilanz haben. Die Bestimmung einer Seewasserbilanz für einen Thermokarstsee im Lena Delta ist umso wichtiger, da für Gebiete in Alaska und der kanadischen Arktis zahlreiche Studien existieren, welche die Interaktionen von Permafrostvorkommen und hydrologischen Prozessen untersuchen (Hinzman et al., 1991; Rovaneck et al., 1996; Quinton & Marsh, 1999; Bowling et al., 2003; Woo & Guan, 2006; Woo et al., 2008; Guan et al., 2010), wohingegen für die russische Arktis nur wenige hydrologische Studien vorliegen (Boike et al., 2008).

## II. Hintergrund

### Das Lena Delta

Die Lena, einer der größten Flüsse der Welt, verläuft in Ostsibirien. Sie entspringt dem Baikalgelände, durchströmt das mittelsibirische Bergland und mündet nach etwa 4.400 km in die Laptevsee, einem Randmeer des Nordpolarmeeres. Ihr Einzugsgebiet umfasst etwa 2.500.000 km<sup>2</sup> und stellt somit eines der größten Abflusssysteme in Russland dar. Das Mündungsdelta der Lena, welches sich zwischen 72° und 74° nördliche Breite sowie 123° und 130° östliche Länge erstreckt, ist mit einer Fläche von etwa 32.000 km<sup>2</sup> das größte Flussdelta der Arktis und eines der größten der Welt (Eicken et al., 2000). Im Delta liegen mehr als 1.500 Inseln, welche von vier Hauptarmen und zahlreichen kleineren Kanälen umspült werden. Ein maximaler Abfluss in die Laptevsee von 62.000 m<sup>3</sup>/s stellt sich im Juni ein (Arcticnet, 2011) und insgesamt beträgt er etwa 30 km<sup>3</sup>/a (Fedorova et al., 2012).

Innerhalb Russlands ist das Lena Delta-Reservat die größte zusammenhängend geschützte Wildniszone. So bietet das Mündungsgebiet ein für viele Tiere und Pflanzen einzigartigen Lebensraum, welches als Nist- bzw. Jagdgebiet oder auch als wichtiger Rastplatz für etliche ziehende Vogelarten dient. Weiterhin konnten sich innerhalb des Deltas große Fischpopulationen entwickeln. Auf Grund seiner Einzigartigkeit wurde das Lena Delta als UNESCO-Welterbe nominiert.

## **Klima**

Sowohl arktische als auch kontinentale klimatische Bedingungen prägen das Lena Delta. Der arktische Einfluss charakterisiert sich durch extrem kalte und feuchte Luftmassen, während warme und trockene Luftmassen kontinentalen Ursprungs sind. Auf Grund der geografischen Lage sind sowohl die Temperaturen als auch die Niederschlagsraten sehr niedrig. Die jährlichen Niederschlagsmengen belaufen sich auf etwa 260 mm (Boike et al., 2008), von denen 45% während der Sommermonate in Form von Regen fallen (Wille et al., 2008).

Die Klimastation in Tiksi, einer Stadt im Süden des Deltas, zeichnete für die Jahre 1961 bis 1999 eine durchschnittliche Temperatur von  $-33,3^{\circ}\text{C}$  für Januar und  $7,1^{\circ}\text{C}$  für Juli auf (ROSHYDROMET, 2006). Die mittlere Jahrestemperatur für den Zeitraum 1961 bis 1990 beträgt  $-13,6^{\circ}\text{C}$ . Die Schneeschmelze beginnt meistens Anfang Mai und die schneefreie Zeit dauert bis Mitte September. Diese schnee- und eisfreien Monate repräsentieren die Vegetationsperiode in diesen Breiten. Die maximalen Temperaturen im Sommer können dabei bis zu  $20^{\circ}\text{C}$  betragen.

Der Winter ist durch eine sehr geringe solare Einstrahlung und die typische mehrwöchige Polarnacht geprägt. Die Temperaturen sinken dabei auf bis zu  $-45^{\circ}\text{C}$  (Langer et al., 2010).

## **Vegetation**

Das Lena Delta liegt in der Tundra, einem Landschaftstyp, welcher die Übergangszone zwischen den arktischen Eisgebieten und dem nördlichen Nadelwald darstellt. An die auf Grund der geografischen Lage extremen Lebensbedingungen in der arktischen Tundra konnten sich nur wenige Arten anpassen. Lediglich in den Sommermonaten gibt es pflanzenverfügbares Wasser, eine kurze Wachstumsphase von etwa zwei bis drei Monaten ist die Folge (CAVMteam, 2003). Dies reicht, um kleineren Pflanzenformationen aus Moosen, Gräsern, Flechten und Zwergsträuchern das Leben zu ermöglichen, allerdings sind diese Pflanzengesellschaften wegen ihrer Spezialisierung auf relativ konstante Umweltverhältnisse angewiesen.

Die Abbildung 1 zeigt Beispiele dieser angepassten Vegetationsformen. Man spricht, entsprechend der Dominanz der jeweiligen Pflanzenarten, von Flechten-, Moos- oder Zwergstrauchtundra. Abbildung 1 links zeigt beispielhaft Moostundra, wie sie besonders auf den weitflächigen Ebenen zu finden ist. An feuchten, windgeschützten Standorten, zum Beispiel in kleinen Senken, können Zwergsträucher und kleine Weidenarten wachsen. Abbildung 1 rechts zeigt im Vordergrund einen Flächenabschnitt der Tundra vor Ort, in dem diese zwei Typen die Vegetationsverhältnisse dominieren.



**Abbildung 1: Tundratypen im Untersuchungsgebiet; links Moos- und Flechten-, rechts Zwergstrauchtundra**

## Geologie und Geomorphologie

Neuere geologische Untersuchungen des Lena Deltas gehen bis auf das Jahr 1993 zurück. Dabei konnten drei verschiedene Flussterrassen bestimmt werden, welche aus unterschiedlichen erdgeschichtlichen Zeitabschnitten stammen (Grigoriev, 1993). Die erste und jüngste Terrasse entstand im Mittelholozän. Durch rezente Anhäufungen erhebt sie sich zwischen einem und zwölf Metern über Meereshöhe über weite Teile im Osten des Lena Deltas. Kennzeichnend sind eine polygonale Tundra, Überflutungsflächen und eine hohe Anzahl an kleinen und größeren Seen. Im nordwestlichen Teil des Deltas findet man eine im späten Pleistozän gebildete Flussterrasse, die sich bis zu 30 m über Meereshöhe erhebt. Sie wird charakterisiert durch grobe sandige Sedimente mit geringem Eisgehalt und großen Seen.

Die dritte und älteste Flussterrasse erhebt sich bis zu 55 m über Meereshöhe. Auf Grund dieser Erhebungen werden diese Flächen auch bei Hochwasser der Lena nicht überflutet, was am Küstenverlauf einer Insel im Lena Delta auf Abbildung 2 gut zu erkennen ist. Diese Flussterrasse dominiert hauptsächlich den Süden des Lena Deltas und besteht aus feinkörnigen organikreichen Sedimenten, welche in einem Eiskomplex gebunden sind. Dieser sogenannte Yedoma besitzt Eisgehalte zwischen 40% und 80 % und unterlagert weite Teile des Lena Deltas (Brown et al., 1999).



**Abbildung 2: Darstellung eines typischen Küstenverlaufes einer Insel im südlichen Lena Delta; fortschr Thermokarst ist sowohl am Uferstreifen als auch an den wieder gefüllten Senken auf der Flussterrasse zu erkennen**

Permafrost wird als „Boden, Sediment oder Gestein, welches in unterschiedlicher Mächtigkeit und Tiefe unter der Erdoberfläche mindestens zwei Jahre stets Temperaturen unter dem Gefrierpunkt aufweist“ definiert (Lexikon der Geowissenschaften. 2., 2000, S. 326). Er ist durch die Ausbildung von Eiskeilen und Eiskomplexen wesentlich für die Geomorphologie der arktischen Tundra verantwortlich. So sind die jahreszeitlich wechselnden Schmelz- und Gefrierprozesse im und am Eiskomplex für die ebenfalls in Abbildung 2 gut erkennbaren typischen polygonalen Tundrastrukturen verantwortlich. Im Verlauf eines Winters zieht sich das Eis im Untergrund immer weiter zusammen und kleine Risse entstehen, welche sich zu Netzstrukturen, den Polygonen, anordnen. Hat solch ein Riss Kontakt zur Oberfläche, kann sich in ihm während der Sommermonate Wasser sammeln, welches durch den Temperaturgradienten nahezu sofort gefriert. So können sich Eisadern ausbilden, welche im Laufe der Jahrzehnte zu mächtigen Eiskeilen von bis zu 40 m Mächtigkeit wachsen können. Durch die dabei stattfindenden Umwälzungsprozesse im Boden entstehen die verschiedenen Polygontypen (Lachenbruch, 1962).

Als Thermokarst wird der Prozess bezeichnet, welcher die Degradation des Permafrostes beschreibt und so zu weiteren großflächigen Veränderungen der Morphologie führen kann. Ein Beispiel hierfür kann das Tauen von Permafrost sein. Durch den entstandenen Volumenverlust im Untergrund können Hohlräume entstehen, welche sich infolge einsetzender Subduktion zu Senken ausbilden können. Depressionen mit steilen Hängen und relativ flachen grasbedeckten Sohlen bilden sich aus. Diese Depressionen können sich sowohl in ihrer Größe als auch in ihrer Tiefe stark unterscheiden und werden als Alasse bezeichnet (SOLOVIEV, 1973). Wenn diese Alasse wassergefüllt sind, spricht man von Thermokarstseen.

Ein weiteres Beispiel für den dynamischen Wandel der Morphologie ausgelöst durch Thermokarst ist gut an dem Verlauf der Uferstreifen zu erkennen. Das im Sommer bis zu 18° C warme Flusswasser der Lena umspült die Inseln im Delta und führt zu weitreichenden Ablationen. Die feinen Sedimente werden erodiert und entlang der Flussströmung abgelagert. Es kommt dadurch zu Landverlust, welcher im Lena Delta bis zu 10 m pro Jahr betragen kann (Günther et al., 2013).

## Hydrologische Besonderheiten

Die Präsenz von Permafrost bestimmt entscheidend die Hydrologie vor Ort. Laterale Wasserbewegungen und damit auch Verlagerungen von im Wasser gelöster Stoffe sind auf eine dünne Schicht, den active layer, im Boden beschränkt. Dieser taut nur im Sommer für mehrere Zentimeter auf und hat auf Grund seiner wechselnden Mächtigkeit großen Einfluss auf laterale Fließwege im Boden.

Untersuchungen von Nelson et al. (2001) belegen, dass es zwischen den Jahren 1956 bis 1990 in der russischen Arktis zu einer Zunahme der Auftaumächtigkeit des active layers um bis zu 0,2 m kam. Es konnte weiterhin nachgewiesen werden, dass die Temperatur des Permafrostes innerhalb der letzten 40 Jahre um bis zu 3° C gestiegen ist. (Lachenbruch et al., 1986; ACIA, 2005).

Darüber hinaus zeigen Studien, dass zwischen 1970 und 2000 eine Temperaturzunahme der Luft von bis zu 0,35 °C pro Jahrzehnt für Regionen innerhalb 50° und 70° Nord stattfand (Serreze & Francis 2006; Euskirchen et al., 2007). Ein mittlerer Anstieg der Temperatur in den Wintermonaten konnte von Yang et al. (2002) nachgewiesen werden. Dies führt zu einer Abnahme der Schneebedeckungsdauer und damit zu späterem Gefrieren sowie früherem Auftauen von See- und Flusseis. (Magnuson et al., 2000; ACIA, 2005; AMAP, 2011).

Die für die letzten Jahre beobachteten Entwicklungen werden sich in naher Zukunft fortsetzen. So wird angenommen, dass die Werte für Evapotranspiration, Lufttemperatur und Niederschlag im Sommer zunehmen werden (Walsh, 2008). Weiterhin wird vermutet, dass auf Grund von steigenden Bodentemperaturen von bis zu 6° C die Mächtigkeiten des active layer in den Sommermonaten auf bis zu zwei Meter ansteigen wird. Als Folge dessen könnte sich der Abfluss arktischer Flüsse noch im 21. Jahrhundert um bis zu 25% erhöhen (Sazonova et al., 2004; ACIA, 2005).

Die Abbildung 3 zeigt die Verteilung des Permafrostes auf der nördlichen Erdhalbkugel. Kontinuierlicher Permafrost, welcher Mächtigkeiten bis zu 1500 m erreichen kann, steht demnach im Norden Alaskas, in Kanada sowie in großen Teilen Russlands an. Diese Vorkommen werden entlang fallender Breitengrade in weiten Bereichen zunächst von diskontinuierlichen und anschließend von sporadischen Permafrostvorkommen abgelöst. Zusätzlich werden Vorkommen unterhalb des Meeresbodens gezeigt, welche dann als submariner Permafrost bezeichnet werden (Brown et al. 1997).

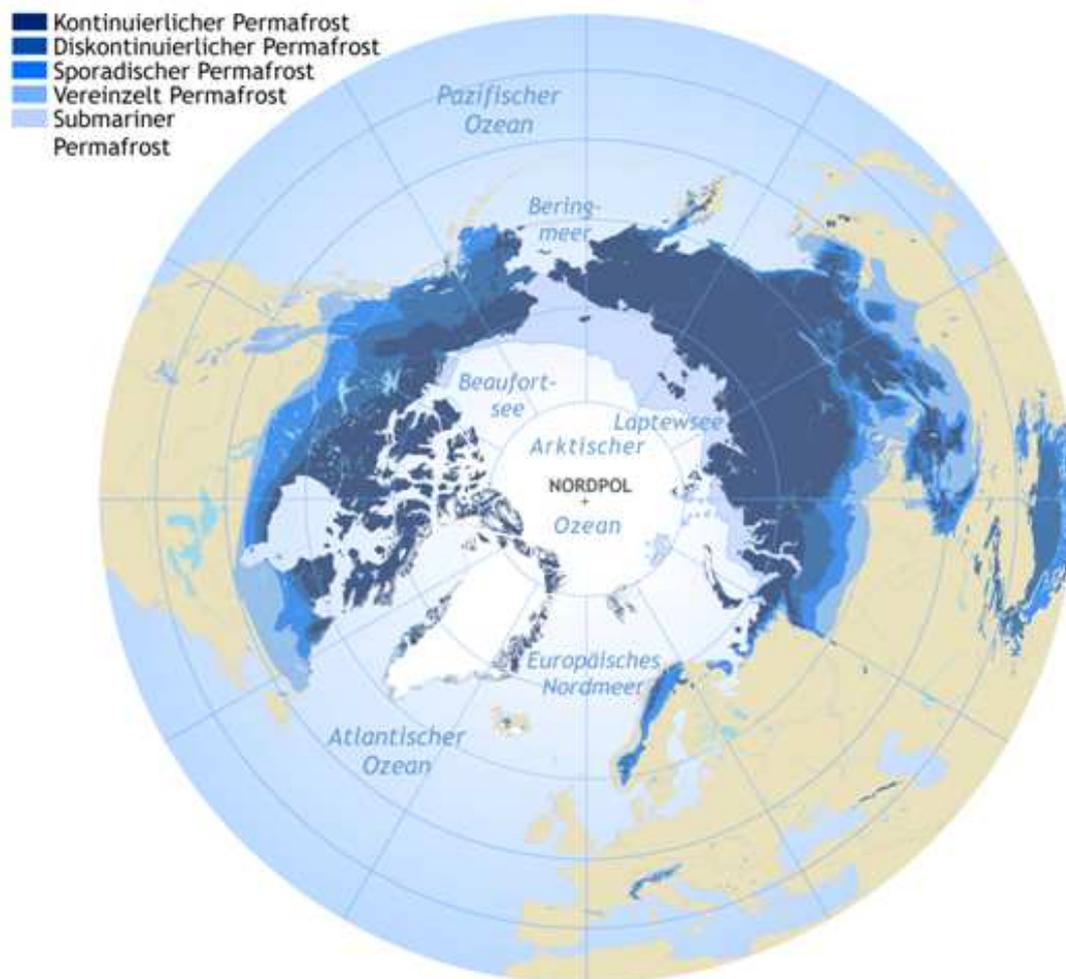
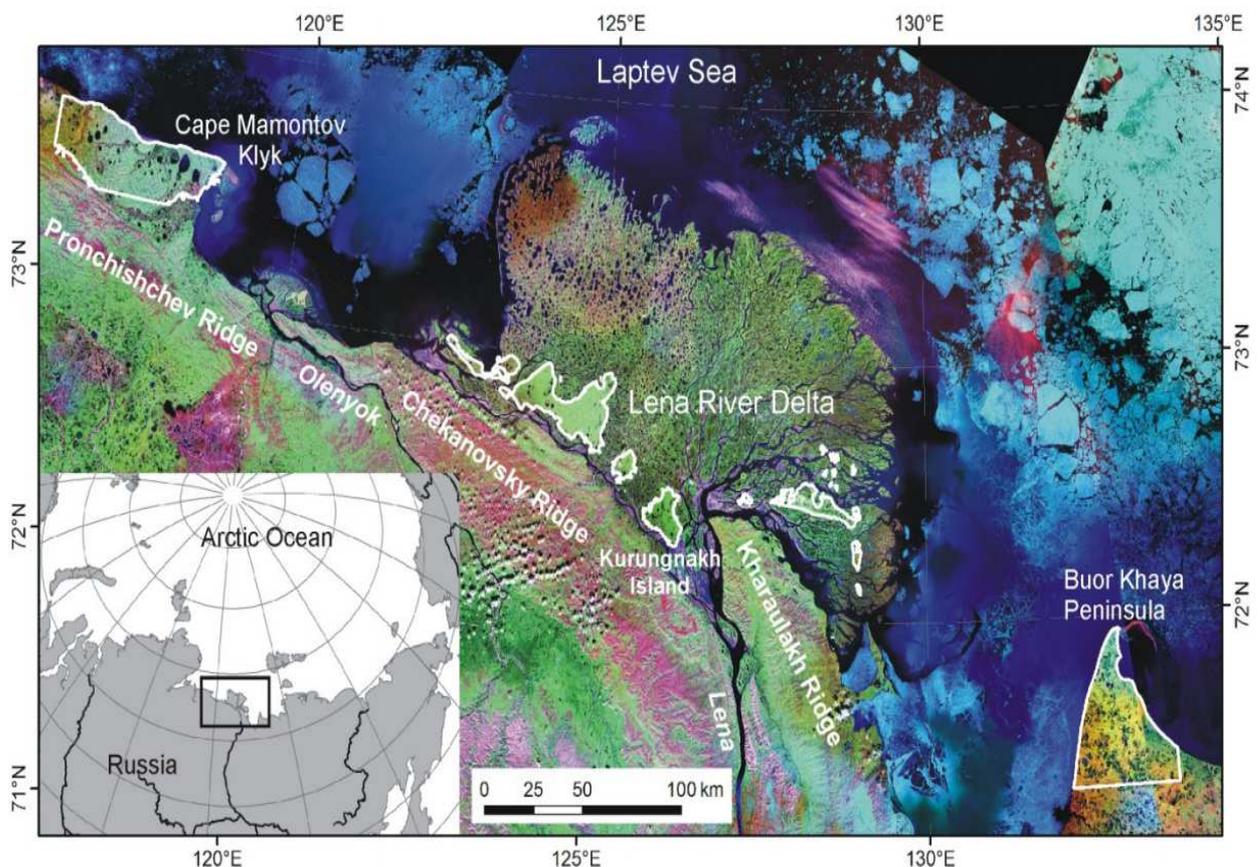


Abbildung 3: Darstellung der Permafrostverteilung auf der nördlichen Erdhalbkugel (Brown et al., 1997)

## Das Untersuchungsgebiet

Kurungnakh bezeichnet eine südlich im Lena Deltas gelegene Insel, welche eine Fläche von etwa 330 km<sup>2</sup> einnimmt. Neben mehr als 1500 weiteren Inseln, ist sie somit zu den größeren Inseln im Mündungsgebiet zu zählen. Die Abbildung 4 zeigt die Lage der Insel global als auch regional (Morgenstern et al., 2012).



**Abbildung 4: Darstellung der Lage der Insel Kurungnakh im Süden des Lena Deltas (Morgenstern et al., 2012)**

Am südlichen Ende von Kurungnakh konnten sich auf Grund von Thermokarstprozessen ebenfalls mehrere großflächige Senken ausbilden. Die zwei südlichsten größeren Senken, welche auf der dritten Flussterrasse liegen, konnten sich mit Wasser füllen und stellen damit gleichfalls Thermokarstseen dar.

Der in Abbildung 5 gezeigte „Lucky Lake“ ist das Untersuchungsobjekt dieser Studie. Er nimmt eine Fläche von ungefähr 1.25 km<sup>2</sup> ein. Seine mittlere Tiefe entspricht dabei etwa 8 m.

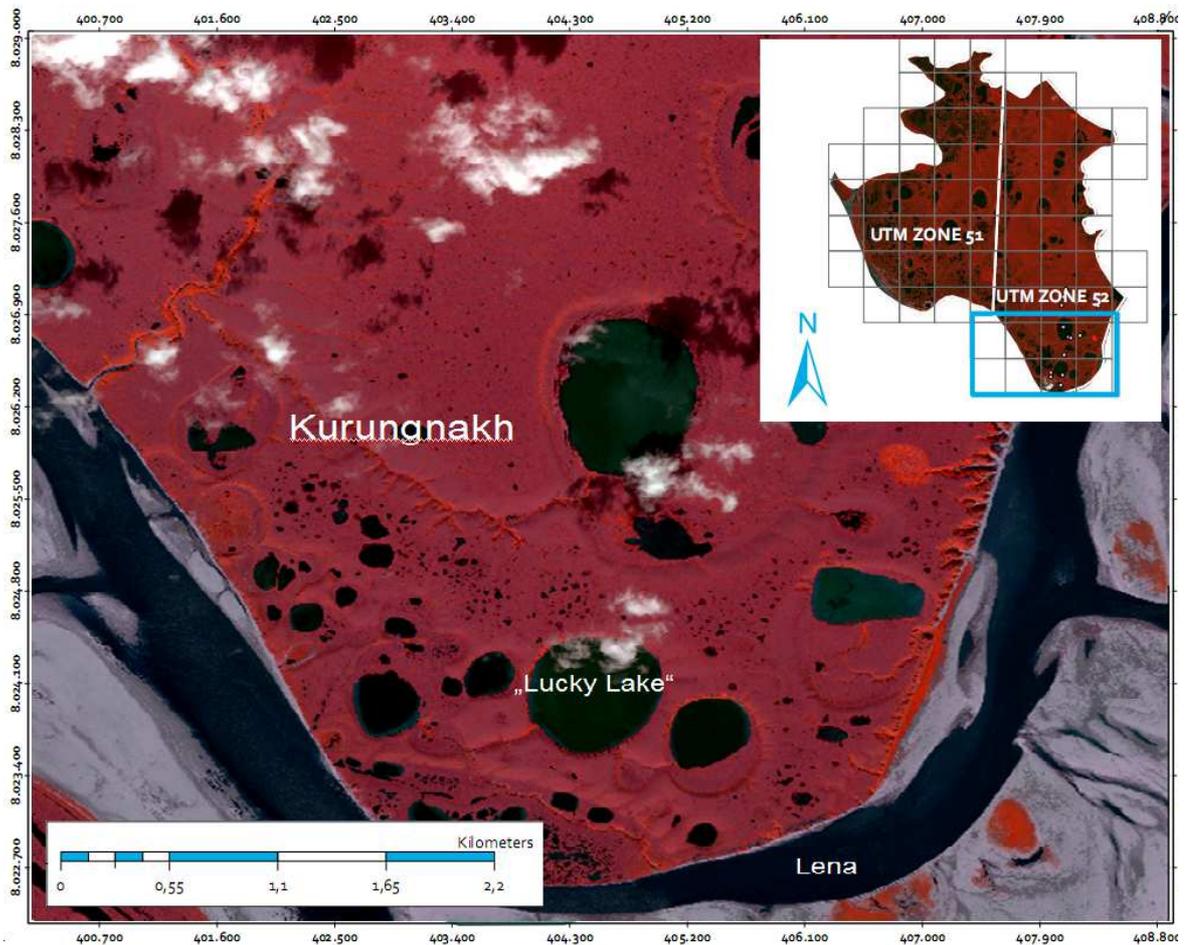


Abbildung 5: Darstellung des Untersuchungsgebietes auf Kurungnakh: Thermokarstsee „Lucky Lake“

Den See zeichnen gleichfalls die typischen steilen Hänge aus, welche zwischenzeitlich von Thermokarstprozessen beeinflusst sind. So geben die in Abbildung 6 a) und c) gezeigten Uferhänge der Westseite sehr gut die Auswirkungen dieser Prozesse wider. Es zeigen sich große Flächen, an denen das Erdreich in Folge von fehlender Bodenstabilität abgerutscht ist. Der Uferverlauf des Sees wird im Nordosten von zwei Gerinnen (Gerinne I, Gerinne II) unterbrochen, über welche die angrenzenden Flächen in den See drainieren.

Abbildung 6 b) gibt einen Eindruck über Gerinne I. Im Südosten existiert ein Zustrom (Abbildung 6 d), welcher „Lucky Lake“ mit einem benachbarten Thermokarstsee verbindet. Je nach Wasserstand der beiden Seen drainiert dieser unterschiedlich ausgeprägt in „Lucky Lake“. Über einen südwestlich gelegenen Ablauf ist das Untersuchungsobjekt mit der Lena verbunden.

a) westlicher Uferhang



b) Gerinne I



c) westlicher Uferhang



d) Zustrom



**Abbildung 6: Darstellung einiger Eigenschaften des Thermokarstsees "Lucky Lake", a) und d) zeigen die steilen Hänge, welche durch Thermokarst beeinflusst und teilweise von Gräsern und kleinen Sträuchern bewachsen sind; b) (Gerinne I) und d) (Zustrom) zeigen oberflächliche Zuläufe**

## Grundlage

Inwieweit sich ein Volumen eines Wasserkörpers während einer definierten Zeitspanne verändert, kann mit Hilfe einer Bilanzgleichung, wie in Gleichung 1 formuliert, bestimmt werden. Betrachtet werden sollen in dieser Studie nach Nicholson et al. (2000) sämtliche direkten In- und Outputmengen des Thermokarstsees, welche während der gewählten Messperiode vom 27.07. bis zum 26.08.2013 eine Volumenveränderung im Wasserkörper auslösen.

$$Q_{in} - Q_{out} = \frac{dV}{dt} \quad (1)$$

$Q_{in}$  = Input

$Q_{out}$  = Output

$dV$  = Volumenänderung

$dt$  = Zeitänderung

Zu den Inputgrößen zählen der gesamte in der Messperiode gefallene Niederschlag und sämtliche oberflächlichen Ströme, die direkt dem See zufließen. Weiterhin gehen potenzielle diffuse Einträge, wie zum Beispiel entlang von Uferkanten, in die Bilanzierung ein. Weiterhin werden auch laterale Zuströme betrachtet. Besonders in den Sommermonaten finden umfangreiche Verdunstungsprozesse statt, die Seewasser in die Atmosphäre transportieren und die somit zu den Outputparametern zu zählen sind. Bestimmt werden soll folglich die direkte Verdunstung über dem See. Des Weiteren findet ein oberflächlicher Abfluss über einen Vorfluter statt, welcher ebenfalls ermittelt wird. Abschließend fasst Abbildung 7 die Parameter der Seewasserbilanzierung noch einmal bildlich zusammen.

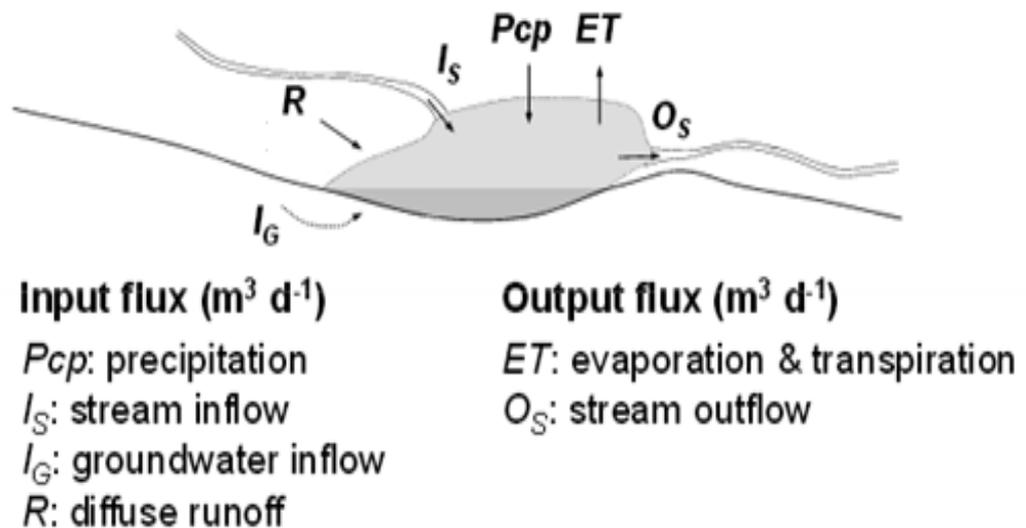
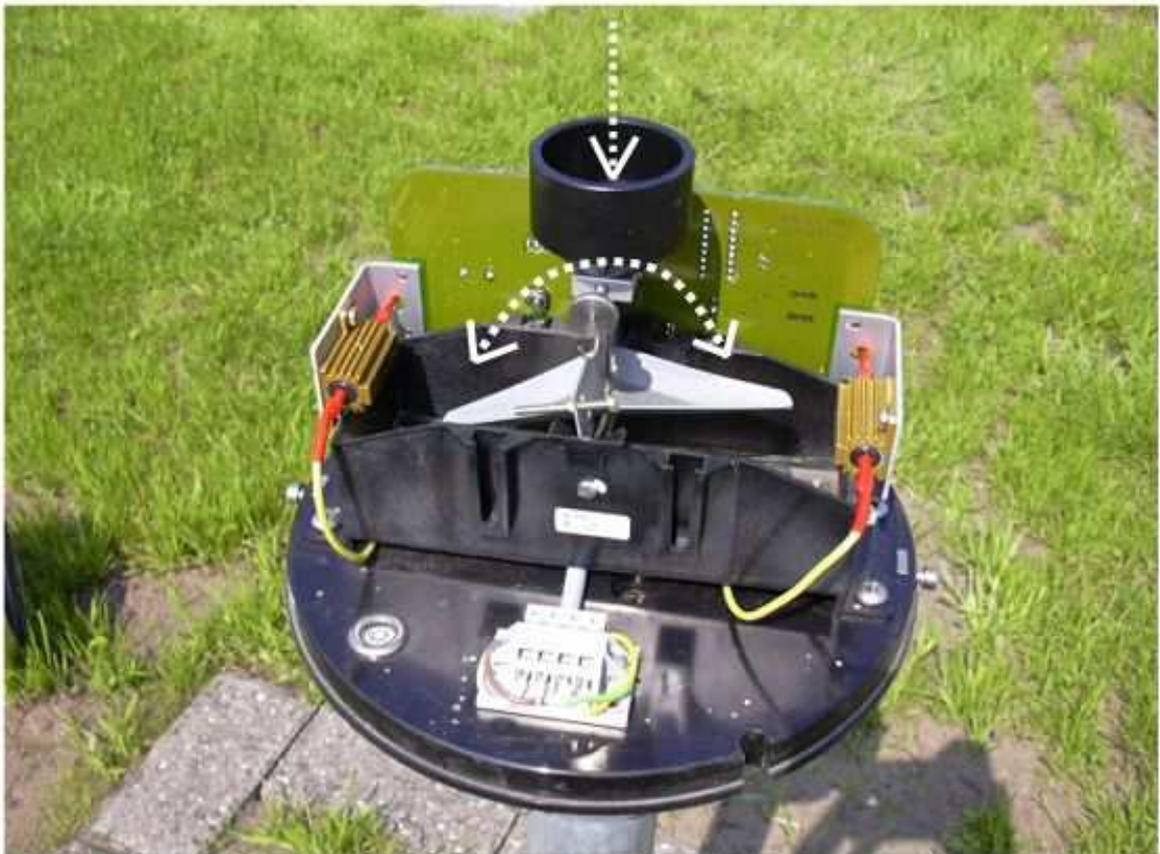


Abbildung 7: leicht veränderte Darstellung der Seewasserbilanzierung nach Nicholson et al. (2000);  
Inputparameter: Niederschlag, Zufluss über oberflächliche sowie unterirdische  
Transportwege und diffusen Eintrag; Outputparameter: Verdunstung und oberflächlicher  
Abfluss

## Messung des Niederschlages

Die Bestimmung der Niederschlagsmengen wurde mit Hilfe eines Niederschlagsmessers, einem Ombrometer, realisiert. Dieser wurde auf Kurungnakh installiert und ermöglicht so die Messung repräsentativer Niederschlagsmengen für das Untersuchungsobjekt. Die Datenaufzeichnung des Ombrometers wurde am 27.07. begonnen und für die gesamte Messperiode kontinuierlich fortgesetzt. Zum Einsatz vor Ort kam eine Messeinrichtung mit der Bezeichnung Young 52202. Im Inneren der Messeinrichtung bestimmt eine Niederschlagswippe das eigentliche Messprinzip, welches in Abbildung 8 gezeigt wird. In einer mechanischen Einheit wird der Niederschlag aufgenommen und in eine Niederschlagswippe geleitet. Ab einem definierten Volumen an Niederschlagswasser wird die Wippe durch eine Kippbewegung entleert.



**Abbildung 8: Darstellung des Niederschlagsmessers, über einen Zulauf gelangt der gesammelte Niederschlag in die Messwippe**

Die Anzahl der Kippvorgänge innerhalb eines Zeitabschnittes wird in der Messeinrichtung aufgezeichnet. Zur Ermittlung der Niederschlagsmenge, welche in einer bestimmten Periode gefallen ist, werden die Größe der Einlassöffnung des Ombrometers, das Volumen einer Kiplade und die gespeicherten Kippvorgänge miteinander verrechnet. Ungenauigkeiten bei der Niederschlagsbestimmung können unter anderem entstehen, wenn eine Wippe nur nahezu gefüllt ist. Kippt sie auf Grund von nachlassendem Niederschlag nicht, wird das bisher aufgefangene Wasservolumen nicht aufgezeichnet und die Messungen werden verfälscht.

## **Bestimmung des Zuflusses**

Für die Ermittlung von direktem oberflächlichem Zufluss in den Thermokarstsee wurden vor Ort mehrere Geländebegehungen durchgeführt. Dabei konnten zwei größere Gerinne im Nordosten und ein Wasserlauf im Südosten als Eintragsquellen identifiziert werden. Messbarer diffuser Wassereintrag in den Thermokarstsee konnte nicht ausgemacht werden.

Zur quantitativen Einordnung des Wasserinputs über die beiden Gerinne, dienten Messungen mit normierten 125-ml-Auffanggefäßen. Das dem Thermokarstsee zuströmende Wasser wurde in einem dieser Messgefäße aufgefangen und die für die Befüllung notwendige Zeit festgehalten. Die Bestimmung des Wassereintrages über die Gerinne konnte während der Messperiode vier Mal erfolgen.

Bei dem Wasserlauf handelt es sich um eine Verbindung zu einem weiter im Osten liegenden Thermokarstsee, welcher in das Untersuchungsobjekt „Lucky Lake“ drainiert. Die Zuflussmessungen wurden mit Hilfe des Messgerätes FLO-MATE der Firma Marsh-McBirney Inc. durchgeführt. FLO-MATE stellt ein mobiles Gerät dar, welches zur Erfassung der Fließgeschwindigkeit eines Gewässers ein magnetisch-induktives Messprinzip verwendet. Der Sensor enthält eine Magnetspule, die ein senkrecht zur Strömung verlaufendes Magnetfeld erzeugt und zwei Elektroden, welche Kontakt zum Wasser haben. Durch das angelegte Magnetfeld werden die Ionen im vorbei fließenden Wasser aufgeteilt; ein elektrisches Potenzial zwischen den beiden Elektroden entsteht. Diese Spannung wird erfasst und von der Mess-elektronik in einen Geschwindigkeitswert für jeden einzelnen Messpunkt umgerechnet. Die Leitfähigkeit des Wassers spielt dabei keine Rolle, da die gemessenen Spannungen nur auf die Stärke des Magnetfeldes, die Länge des Leiters und die Fließgeschwindigkeit zurückzuführen sind. Wird innerhalb eines Querschnittes an bestimmten Punkten die Geschwindigkeit ermittelt, kann so ein Volumenstrom interpoliert werden. Zwischen dem 25.07. und dem 23.08. konnten die Durchflussmessungen an dem Wasserlauf vier Mal durchgeführt werden.

## **Suprapermafrostwasser-Untersuchung**

Suprapermafrostwasser ist jenes Wasser, welches sich entweder durch Niederschlag oder aber durch Abtauen des Permafrostes im Sommer auf der Permafrosttafel sammeln kann. Innerhalb des active layers kann es zu lateralen Wasserbewegungen kommen, welche als möglicher unterirdischer Zufluss in die Seewasserbilanz eingehen könnten (Black, 1954). Um diesen Zufluss quantitativ möglichst umfassend erfassen zu können, wurden Positionen für Suprapermafrostwasser-Messstellen gewählt, welche sich innerhalb des Einzugsgebietes des Thermokarstsees befanden und an denen diese Wasservorkommen vermutet wurden. Die Topographie des Untersuchungsgebietes erlaubt dabei eine gute Einschätzung des Einzugsgebietes des Thermokarstsees vor Ort. Hilfreich waren die für die Alasse auf Kurungnakh typischen steilen Hänge der Seeufer. Aus der Arbeit von Günther (2009) konnte ein digitales Geländemodell von Kurungnakh mit einer Auflösung von fünf Metern genutzt werden. Darauf aufbauend wurden mittels ArcGIS sowohl die Seefläche von 1,25 km<sup>2</sup> und das Einzugsgebiet des Sees bestimmt, welches demnach etwa 0,5 km<sup>2</sup> einnimmt. Diese Ergebnisse deckten sich mit den während der Arbeit im Gelände getroffenen Einschätzungen.

Innerhalb dieses Einzugsgebietes wurden zum einen zwei Messstellen am östlichen Uferhang von „Lucky Lake“ installiert. Diese Messpunkte sollten die typischen großflächigen Tundraflächen mit ihrem dichten Moos- und Flechtenbewuchs repräsentieren. Dazu kommen drei Messstellen, welche die Suprapermafrostwasser-Bewegungen innerhalb der Gerinne aufzeichnen sollten. Es wurden zwei Messstellen in Gerinne I und eine in Gerinne II installiert. Zwei weitere Messstellen konnten zudem in den Zulauf im Südosten installiert werden.

Alle Messstellen funktionieren dabei nach demselben Prinzip. Sie bestehen aus einem etwa einen Meter langen PVC-Rohr, welches so bis auf 60 cm verfiltert wurde, dass potenzielles Suprapermafrostwasser durchströmen kann. Um die Stabilität der Messeinrichtung besonders im Hinblick auf das fortschreitende Auftauen des Permafrostes während der Messperiode zu garantieren, wurden mit einem Handbohrer bis zu 50 cm tiefe Bohrungen in den Permafrost gefräst und darin die Pegelrohre eingelassen. Anschließend wurden sie mit dem Drucksensor BTE 6000 der Firma Sensortechnics ausgestattet und mit einem Deckel verschlossen, welcher Verfälschungen der Messungen durch eingetragenes Niederschlagswasser verhindern sollte. Durch diesen Aufbau, Abbildung 19 zeigt diesen exemplarisch, sowie die Verwendung des Datenloggers CR 200 der Firma Campbell Scientific, Inc., konnten an allen Messstellen ab dem 27.07. minütliche Aufzeichnungen realisiert werden.



**Abbildung 9: Darstellung einer Suprapermafrostwasser-Messstelle, Drucksensoren messen den Wasserspiegel**

Parallel dazu wurde die Auftaumächtigkeit des Permafrostes bestimmt, um abschätzen zu können, wie viel Suprapermafrostwasser, welches sich auf Grund von Tauprozessen des Permafrostes auf der Permafrosttafel sammelt, ansteht. Es besteht so die Möglichkeit die gemessenen Werte der Pegelmessstellen zu validieren. Die Mächtigkeit des active layers wurde dabei an neun verschiedenen Punkten im nahen Umfeld des Sees bestimmt. Die Messungen konnten während des Untersuchungszeitraumes bis zu drei Mal wiederholt werden. Verwendet wurde eine angespitzte Metallstange, welche mit einer Skala versehen ist. Diese Stange kann ohne Probleme an jedem Standort in den Boden geschoben werden und wird erst bei Erreichen der Permafrosttafel gestoppt. Während dieser Kampagne konnten die Messungen im südlichen Ufer, im südlichen Plateau sowie im östlichen und westlichen Plateau bis zu fünf Mal wiederholt werden. Begonnen wurde dabei bereits am 14.07. bzw. 15.07. weitere Untersuchungen fanden am 9.08. bzw. 10.08. sowie abschließend am 26.08. statt. An den Positionen im Ufer und im Plateau westlich des Thermokarstsees wurden die Messungen zu Beginn und am Ende der Messperiode durchgeführt.

Zusätzlich wurden Bodenfeuchtemessungen vorgenommen. Mit Hilfe des Messgerätes TDR 100 der Firma Campbell Scientific konnte die Bodenfeuchte am jeweiligen Standort aufgenommen werden. Dazu wurden 50 x 50 cm große Raster gewählt, welche in ihrer Tiefe bis auf den Permafrost reichten. Direkt unter dem Bewuchs, also im ersten Bodenhorizont beginnend, wurden horizontal die 50 cm des Rasters bemessen. Dieses Messverfahren wurde in verschiedenen Tiefen bis zum anstehenden Permafrost fortgesetzt und erlaubt es so, ein Bodenfeuchteprofil für den jeweiligen Standort zu ermitteln. Für beide Messreihen wurden auch hier heterogene Strukturen der Landschaft gewählt, welche – regelmäßig beprobt – die unterschiedlichen Dynamiken innerhalb des active layer wiedergeben. Gemessen werden konnte auf Grund eines engen Expeditionszeitplanes nur am 12.08. sowie am 16. und 17.08. in insgesamt neun Messfeldern, welche sowohl direkt am Ufer als auch im angrenzenden Einzugsgebietes lagen.

## **Ermittlung der Wasserstandsänderung**

Die Veränderungen des Wasserstandes im Thermokarstsee konnten ebenfalls mit einem Drucksensor gemessen und aufgezeichnet werden. So wurde bereits zu Beginn der Messperiode am 25.07. der Drucksensor U20-002 des Herstellers Onset auf dem Grund des Thermokarstsees verankert. Dieser misst eine Erhöhung des Druckes, welche relativ zum atmosphärischen Druck auf Grund der über ihm stehenden Wassersäule initiiert wird. Messungenauigkeiten betragen dabei nach Angaben des Herstellers nur 0,3 %. Die Position des Drucksensors im See spielt bei der Betrachtung keine Rolle, da lediglich die Wasserstandsänderung und somit ein Anstieg bzw. ein Verlust des Wasservolumens relevant ist.

Zusätzlich zu den Aufzeichnungen hinsichtlich des Wasserstandes kann mit dem ausgebrachten Sensor die Oberflächentemperatur des Thermokarstsees kontinuierlich gespeichert werden.

## **Verdunstungsbestimmung**

Für die Ermittlung der Verdunstungsraten wurden bereits am 23.07. zwei Schwimmlysimeter auf dem See ausgebracht. Die Schwimmlysimeter bestehen aus einem flachen offenen Behälter, der in einem Styroporring eingelassen ist. In diesen Behälter wurde eine definierte Menge Wasser eingefüllt, welche offen schwimmend auf der Wasseroberfläche genauso Verdunstungsprozessen ausgeliefert ist, wie das Wasser des Sees. Aus dem Gewichtsverlust, der sich nach wiederholtem Auswiegen der Schwimmlysimeter einstellt, kann eine Verdunstungsrate ermittelt werden.

Zusätzlich wurden für die Bestimmung der Verdunstung die Klimadaten der meteorologischen Station auf Kurungnakh herangezogen, welche Halbstundenwerte aufzeichnet. Diese umfassen unter anderem Lufttemperatur, vorherrschende Luftfeuchtigkeit, als auch Windgeschwindigkeit und -richtung. Die für die Berechnung der potenziellen Verdunstung genutzten Klimadaten sind von besonderer Relevanz für die Betrachtung der Wasserbilanz.

Sie stellen zum einen die Grundlage für die Berechnung der Verdunstungswerte dar und stehen darüber hinaus zur Validierung der gemessenen Werte der Schwimmlysimeter zur Verfügung. Die aufgezeichneten Daten der meteorologischen Station sowie die Temperaturwerte des Thermokarstsees erlauben eine Verdunstungsbestimmung nach einem indirekten Bestimmungsverfahren. Grundlage ist nach Garratt (1994) ein Gradientenansatz, welcher einen Dampfdruckunterschied zwischen einer Wasseroberfläche und der Luft beschreibt. Dieser Druckunterschied ist stets bestrebt sich auszugleichen; deshalb findet ein Wassertransport entlang des Potenzialunterschiedes statt. Zur Bestimmung der Verdunstung werden die Temperatur der Seeoberfläche sowie die Lufttemperatur in einer bestimmten Messhöhe ( $z_m$ ) benötigt. Weiterhin ist die Luftfeuchtigkeit in der Messhöhe ( $z_m$ ) sowie in einer weiteren Messhöhe ( $z_0$ ) für die Berechnung erforderlich. Die folgenden Gleichungen (1) bis (3) beschreiben die mathematischen Zusammenhänge.

$$E = \frac{Q_E}{L_V * \rho_{Air}} \quad (1)$$

Nach Gleichung (1) berechnet sich die potenzielle Verdunstung  $E$  aus dem Verhältnis eines latenten Wärmeflusses zwischen zwei Messpunkten  $Q_E$ , der Verdampfungswärme  $L_V$  und der Dichte der Luft  $\rho_{Air}$ .

$$Q_E = \frac{L_V * (-\rho_{Air})}{r_a * (q_{(z_m)} - q_{(z_{surf})})} \quad (2)$$

Die Gleichung (2) beschreibt die Berechnung des latenten Wärmeflusses  $Q_E$ . Betrachtet wird die Differenz zwischen der spezifischen Feuchte in einer bestimmten Messhöhe  $q_{(z_m)}$  und der spezifischen Feuchte an einer Wasseroberfläche  $q_{(z_{surf})}$ . Die Entwicklung des Wärmeflusses  $Q_E$  wird besonders von dem aerodynamischen Widerstand  $r_a$  bestimmt. Dieser stellt eine Kraft dar, die dem Wärmefluss entgegenwirkt. Mit Gleichung (3) wird dessen mathematische Herleitung formuliert.

$$r_a = \frac{\left(\ln \frac{(z_m)}{(z_0)}\right)^2}{u_{(z_m)} * k^2} \quad (3)$$

Dabei stellt die  $u_{z_m}$  horizontale Windgeschwindigkeit in der Messhöhe ( $z_m$ ) mit 200 cm dar. Des Weiteren wird die von-Karman-Konstante  $k$  für die Berechnungen benötigt. Diese berücksichtigt die Auswirkung der Turbulenzen entlang der Grenzschicht zwischen Boden und Luft und wird mit dem Faktor 0,4 angegeben. Zusätzlich geht eine Rauigkeitslänge ( $z_0$ ) für stille Wasseroberflächen von  $0,1 \times 10^{-3}$  m in die Berechnung ein (Garratt, 1994).

## Abflussmessung

Für die Bestimmung der Abflussmessungen während der Messperiode wurde eine Kombination aus einem Wehr und einem Radar-Höhensensor gewählt. Bei dem Wehr handelt es sich um eine Messrinne der Firma Eijkelkamp mit der Bezeichnung RBC Flume 13.17.08. Dieses im Kern trapezförmige Wehr wurde speziell für den Einsatz in Gräben sowie in natürlichen Kanälen entwickelt. Die Trapezform entspricht dabei der natürlichen Form vieler Gewässer und ermöglicht so Messungen mit einer sehr hohen Genauigkeit. Die Abbildung 10 zeigt eine Draufsicht des Wehres und benennt die einzelnen Komponenten. Über den Zulauf (1) gelangt der Wasserstrom in das Wehr. Im nächsten Teilstück (2) wird die Fließgeschwindigkeit des Zustromes gedrosselt, um im anschließenden Teilbereich (3) die Möglichkeit zu bieten, Abflussmessungen durchführen zu können. Die beiden folgenden Sektionen (4 und 5) erlauben dem durchströmendem Wasser einen Angleich an die vor dem Wehr herrschenden Fließgeschwindigkeiten. An einem direkt am Wehr verbauten Pegelrohr (6) kann zusätzlich der Durchfluss im Wehr abgelesen und mit einem Drucksensor automatisch aufgezeichnet werden.

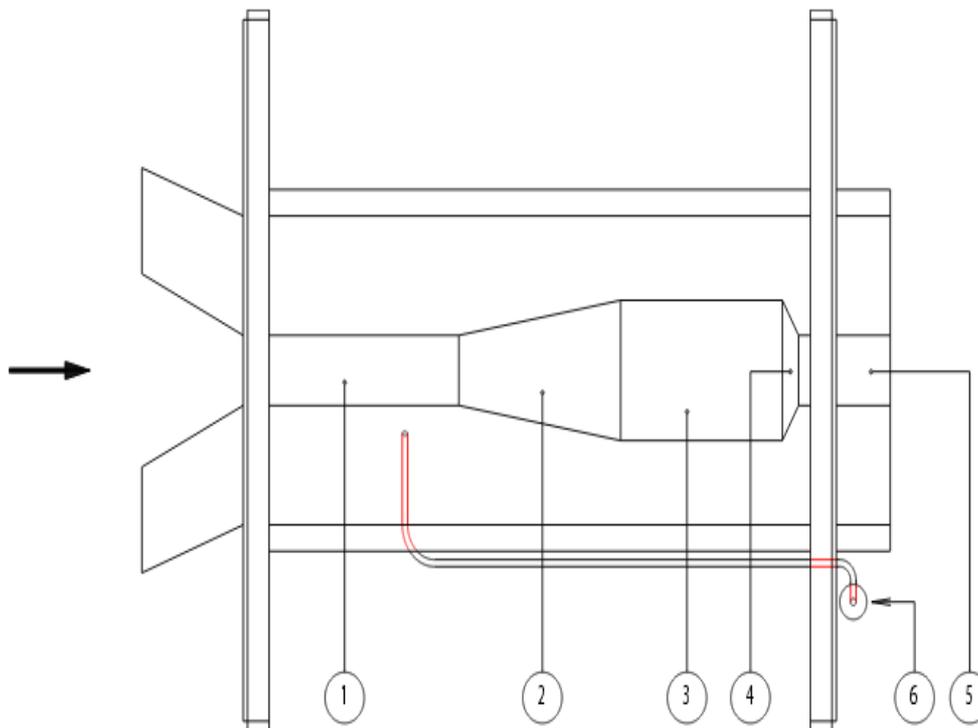


Abbildung 10: Darstellung einer schematischen Draufsicht des im Ablauf installierten Wehres

Das verwendete Wehr erlaubt Durchflussmessungen zwischen minimal 2 l/s und maximal 145 l/s und ist somit für den Einsatz im abwechslungsreichen Untersuchungsgebiet gut geeignet. Das Wehr wurde so installiert, dass der Abfluss von „Lucky Lake“ ungestört durch die Messeinrichtung fließen kann und somit die gemessenen Werte als solide Datengrundlage zur Verfügung stehen. Zur manuellen Abflussbestimmung befindet sich innerhalb des Wehres eine Skala, die den Wasserpegel im Wehr und gleichzeitig den aktuellen Abfluss durch das Wehr anzeigt. Um eine automatische und kontinuierliche Messung des Wasserstandes im Wehr zu verwirklichen, wurde zusätzlich ein Radar-Höhensensor fest am Wehr verbaut. Zum Einsatz kam der Vegapuls WL 61 der Firma Vega. Dieser unter anderem für Füllstandsmessungen in Pumpstationen sowie Regenüberlaufbecken entwickelte Sensor eignet sich auch für Durchflussmessungen in offenen Gerinnen gut, denn aktuelle Wasserstände im Wehr werden über die Zeit ermittelt, die die vom Wasser reflektierten Radarwellen brauchen, bis sie wieder am Sensor sind. So erlaubt die Verwendung des Vegapuls WL 61 ganzjährige Messungen, da kein direkter Kontakt mit dem Wasser im Wehr besteht und der Sensor in seiner Funktion nicht beeinträchtigt werden kann. Weiterhin kann möglicher Schaden durch wieder gefrierendes Wasser ausgeschlossen werden. Aus dem vom Sensor erfassten Wert kann anschließend mit Hilfe eines Umrechnungsfaktors der aktuelle Abfluss bestimmt und in einem Datenlogger gespeichert werden. Messungengenauigkeiten des Sensors bezüglich der gemessenen Wasserstandshöhe werden selbst bei korrekter Ausrichtung auf dem Wehr vom Hersteller auf etwa  $\pm 2\%$  beziffert. Um Datenaufzeichnungen mindestens für ein Jahr möglich zu machen, müssen sowohl der Sensor, als auch der Datenlogger kontinuierlich mit Strom versorgt werden. So wurde die Elektronik der Messeinrichtung zum einen mit zwei leistungsstarken Akkumulatoren ausgestattet. Verwendet wurden hierfür Blei-Gel Akkumulatoren, welche eine Leistung von 60 Amperestunden aufweisen und so eine ausreichende Energiemenge für einen mindestens 3-monatigen Betrieb zur Verfügung stellen können. Zusätzlich konnte ein Solarpanel installiert werden, welches Sonnenenergie in nutzbaren Strom umwandelt, die Akkumulatoren auflädt und so eine fortlaufende Stromversorgung ermöglicht. Die Abbildung 11 zeigt den Aufbau der Messeinrichtung im Gelände.



**Abbildung 11: Darstellung des Wehres mit fest installiertem Radar-Höhensensor;  
linke Bildhälfte: Solarpanel und Schutzkiste für Elektronik**

Zu bemerken ist, dass am Einlass des Wehres die schon vorgefertigten Bleche verlängert wurden. Nicht zu erkennen ist eine Plastikfolie, welche mit dem Sockel des Wehres verbunden und anschließend im Bett des Gerinnes vergraben wurde. Diese beiden Zusätze waren notwendig um sicherzustellen, dass sämtliches Wasser des Gerinnes durch das Wehr fließen muss. Zu sehen ist weiterhin das Solarpanel, welches südlich exponiert auf einer Metallkiste verschraubt wurde, um das Aufladen der Akkumulatoren stets zu ermöglichen.

## Zusammenfassung

Die aufgenommenen Parameter der Seewasserbilanzierung sind abschließend in Tabelle 1 aufgelistet. Dazu zählen: der Niederschlag, der über dem See abregnet, wie auch direkter Zufluss, zum einen über zwei Gerinne und zusätzlich über den Zustrom eines benachbarten Thermokarstsees. Darüber hinaus wurden auch potenzielle laterale Wasserbewegungen betrachtet. Weiterhin wurden Verdunstungswerte bestimmt und sowohl die Quantitäten des Abflusses, über welchen das Untersuchungsobjekt in die angrenzende Lena drainiert, als auch die Entwicklung des Sees in seiner Funktion als Wasserspeicher ermittelt. Die Rohdaten stellen dabei einen überaus umfangreichen und nahezu lückenlosen Datenpool zur Verfügung, der einen Zeitraum von etwa vier Wochen wiedergibt.

**Tabelle 1: Übersicht der Messkampagne im Untersuchungsgebiet**

<b>Parameter</b>	<b>Messprinzip</b>	<b>Lage</b>	<b>Messdauer</b>
Niederschlag	Ombrometer	Klimastation	27.07.2013 – 26.08.2013
Zufluss	Durchflussmessungen, Auffangtrichter	Zulauf aus benachbartem See, Gerinne im Nordosten	5x während der Messperiode
Suprapermafrostwasser	Drucksensor	7 Messstellen	27.07.2013 – 26.08.2013
Seespeicher	Drucksensor	Seeboden	27.07.2013 – 26.08.2013
Abfluss	Wehr mit Radar-Höhensensor	Auslass im Südwesten	27.07.2013 – 26.08.2013
Verdunstung	Schwimmlysimeter, Klimadaten	Ufer im Süden	27.07.2013 – 26.08.2013
Auftautiefe	manuelle Messungen	Einzugsgebiet	3x während der Messperiode
Bodenfeuchte	Feuchtesensor	Einzugsgebiet	9x während der Messperiode

Darüber hinaus kann in Abbildung 12 die Lage aller Messpunkte vor Ort entnommen werden. Gezeigt wird ebenfalls das Einzugsgebiet des Thermokarstsees, welches auf Grund der steilen Hänge etwa 0,5 km<sup>2</sup> einnimmt.

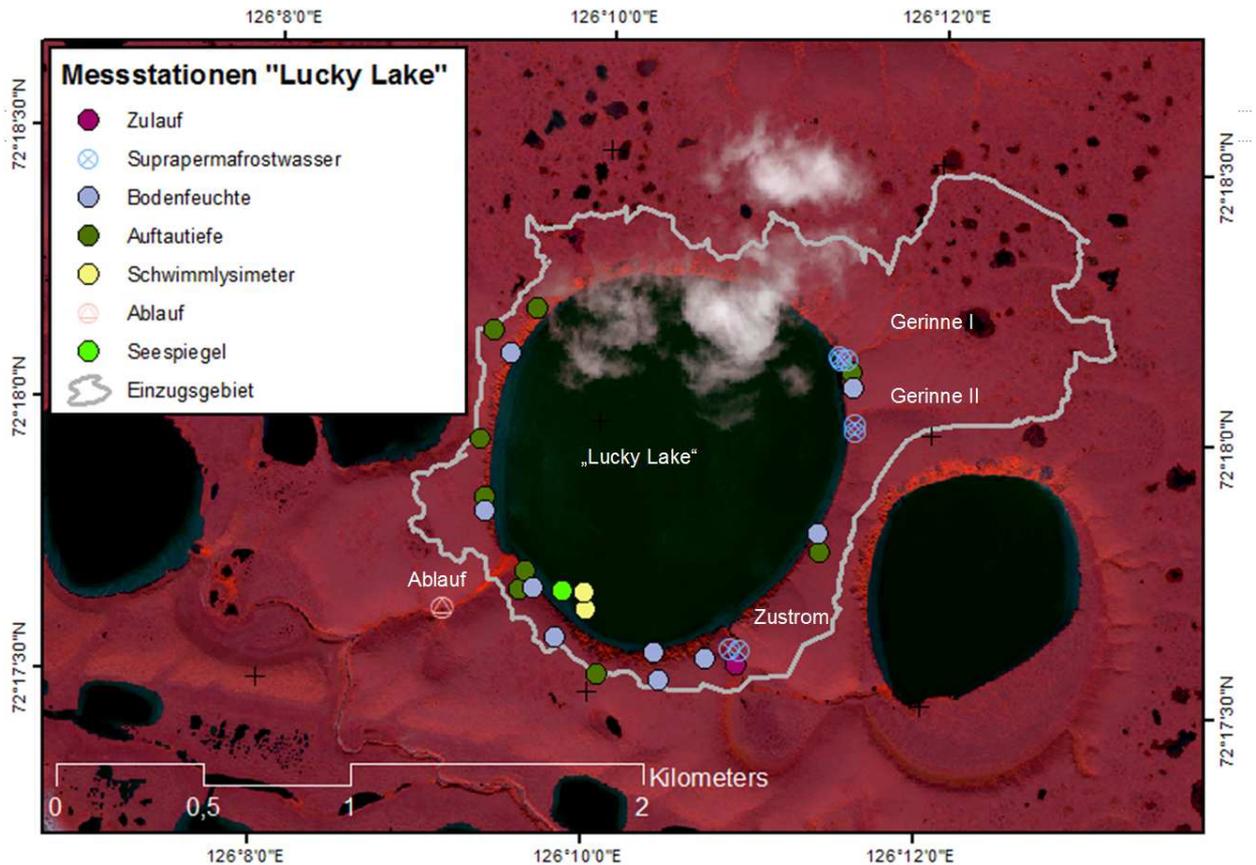


Abbildung 12: Darstellung der Messstationen im Untersuchungsgebiet und des Einzugsgebietes des Thermokarstsees

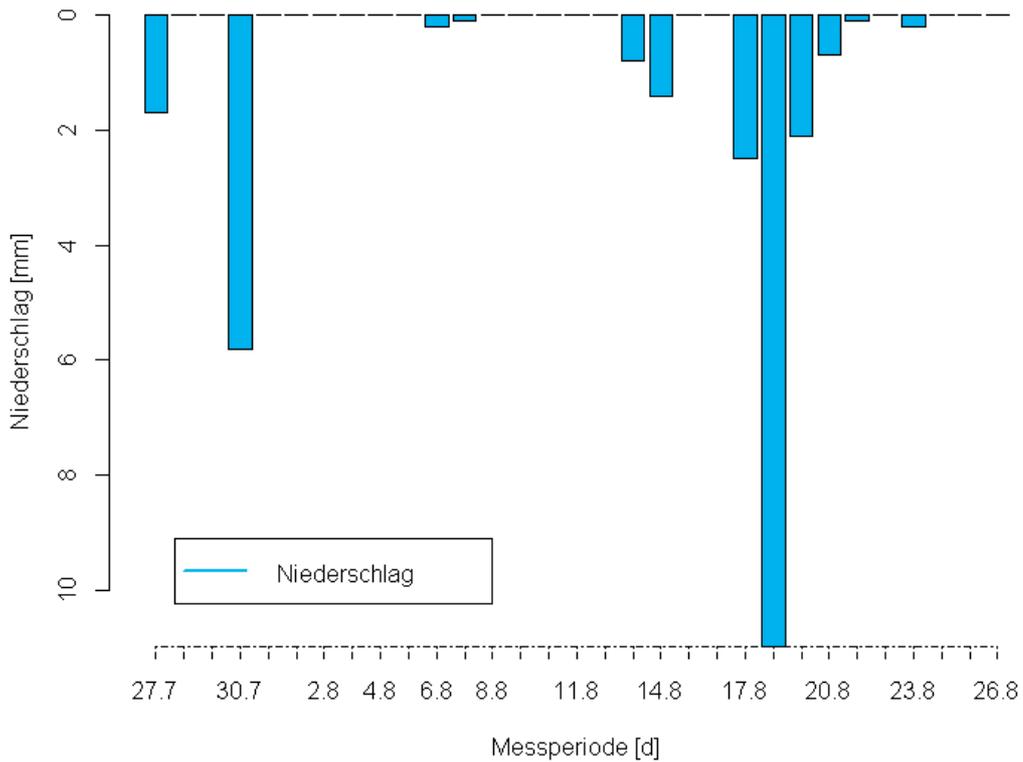
## V. Ergebnisse

Für das Erstellen dieser Seewasserbilanz war es sinnvoll, die aufgezeichneten Messwerte der jeweiligen Bilanzparameter in Tagesmittelwerte zusammenzufassen. Entwicklungen, die sich innerhalb von Stunden oder gar Minuten abspielen, können interessant sein, wenn man zum Beispiel ermitteln möchte, wie lange die Antwort eines Abflusses auf einsetzenden Niederschlag dauert. Diese Seewasserbilanz beschäftigt sich vordergründig mit den bewegten Wassermassen innerhalb einer für die Sommermonate in der arktischen Tundra repräsentativen Zeitspanne. Aus diesem Grund wurden die Rohdaten des vierwöchigen Untersuchungszeitraumes mit Hilfe statistischer Verfahren zusammengefasst.

### Niederschlag

Die vom Ombrometer aufgezeichneten Daten sind in Abbildung 13 zu sehen. Innerhalb der Messperiode konnten mehrere Niederschlagsereignisse aufgezeichnet werden. Die ersten Messergebnisse wurden am 27.07. sowie am 30.07. gespeichert. Am 27.07. regnete es demnach 1,7 mm. Die Aufzeichnungen für den 30.07. ergeben eine Niederschlagsmenge von 5,8 mm. Die nächsten Niederschlagsereignisse fanden im Zeitraum 13.08. und 14.08. statt. Während dieser beiden Tage fiel ein Niederschlag von 2,5 mm. Zwischen dem 16.08. und dem 21.08. belegen die Daten eine längere Regenperiode. Anfangs wurde für den 17.08. im Tagesmittel eine Niederschlagsmenge von 2,5 mm aufgezeichnet. Am 18.08. stellte sich der Maximalwert während der Messperiode ein, bei diesem Regenereignis wurden 11 mm Niederschlag gemessen. An den folgenden Tagen nahm die Intensität des Niederschlages wieder ab.

So betrug die Niederschlagsmenge am 19.08. 2,1 mm. Am 20.08. fielen noch 0,7 mm Niederschlag im Tagesmittel. Gegen Ende des betrachteten Regenereignisses konnten für den 21.08. bzw. den 23.08. 0,1 mm sowie 0,2 mm festgehalten werden. Innerhalb der Messperiode fielen demnach kumuliert 26,6 mm Niederschlag, was bei der Fläche des Sees einem Wasservolumen von 33.250 m<sup>3</sup> entspricht.



**Abbildung 13: Darstellung des Niederschlages im Untersuchungsgebiet für die vollständige Messperiode**

## Zufluss

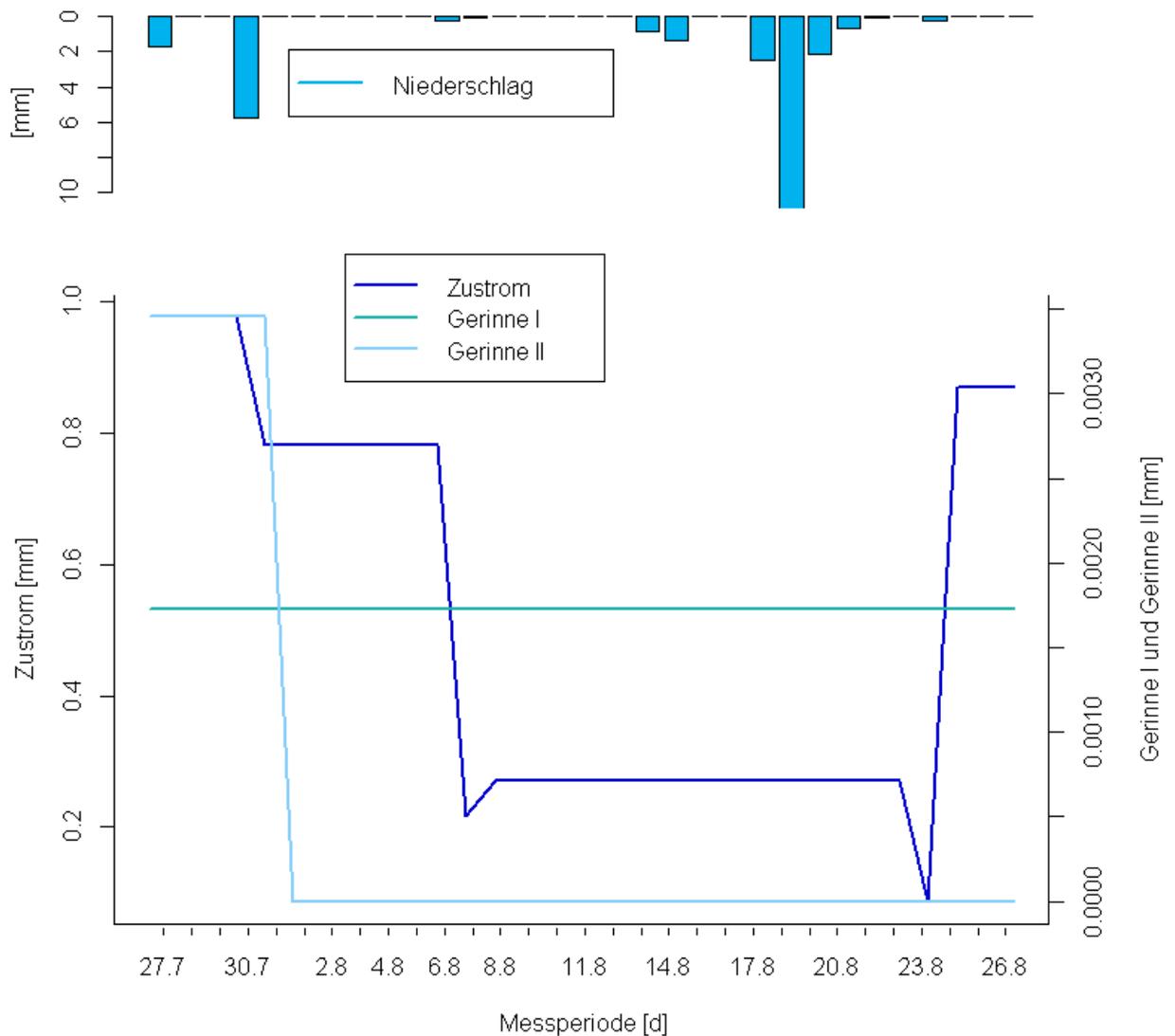
Die quantitative Bestimmung des Zuflusses über die Gerinne im Osten des Thermokarstsees wurde innerhalb der Messperiode an vier Tagen durchgeführt und jeweils mehrfach wiederholt. Die an diesen Tagen bestimmten Eingangsgrößen wurden dabei bis zur nächsten Messung als konstante Tagesmittelwerte angenommen. Schon während der Untersuchungen vor Ort konnte festgestellt werden, dass nur zu Beginn der Messperiode über beide Gerinne ein direkter Input in den Thermokarstsee erfolgte.

So lieferte im Verlauf der Messperiode lediglich Gerinne I einen kontinuierlichen Input von etwa  $2 \times 10^{-3}$  mm pro Tag. Über das weiter im Süden befindliche Gerinne II konnten zwar am Anfang eingetragene Mengen von etwa  $4 \times 10^{-3}$  mm pro Tag bestimmt werden, allerdings wurde ab dem 01.08. kein weiterer direkter Input gemessen. Aufsummiert ergibt sich für die beiden Gerinne Quantitäten von 0,124 mm während des Untersuchungszeitraumes.

Hinzu kommt der direkte Eintrag aus dem benachbarten Thermokarstsee. Die Messungen konnten an den Tagen 26.07., 30./31.07., und 06./07./08.08. sowie am 22./23./24.08. durchgeführt werden. Sie liefern damit eine ausreichend genaue zeitliche Abdeckung der betrachteten Untersuchungsperiode. Auch bei der Bestimmung der Wassermengen, welche über den Zulauf einströmten, wurden die jeweiligen Messungen bis zur nächsten Bestimmung als konstant angenommen. Zu Beginn der Messungen ergaben sich Eingangswerte von etwa 1 mm pro Tag, welche zunehmend auf knapp 0,2 mm abnahmen. Nach dem großen Regenereignis am 18.08. mit einem Niederschlagsmaximum von 11 mm konnten am 24.08. wieder 0,85 mm als direkter Input ermittelt werden. Zusammenfassend flossen innerhalb der Messperiode 16,4 mm oder  $20.600 \text{ m}^3$  aus dem benachbarten Thermokarstsee in das Untersuchungsobjekt.

Abbildung 14 zeigt den Verlauf des Wasserinputs der beiden Gerinne und des Zulaufes. Die Folgen während der Trockenperiode und nach dem großen Regenereignis sind dabei gut erkennbar.

Weiterhin ersichtlich ist der große Unterschied hinsichtlich der eingetragenen Wassermengen, welcher zwei Zehnerpotenzen ausmacht. Während über die Gerinne lediglich 0,124 mm eingetragen wurden, betrug der Input über den Zulauf 16,4 mm während der betrachteten Periode. Bei der Darstellung in Abbildung 14 wird dies durch die Einführung einer zweiten y-Achse berücksichtigt. Die viel kleineren Einträge über die beiden Gerinne erfordern eine eigene Skala und werden auf der rechten y-Achse abgelesen.



**Abbildung 14: Darstellung des direkten Wassereintrages in den Thermokarstsee und der entsprechenden Niederschlagsentwicklung; Zustrom (linke y-Achse), Gerinne I und II (rechte y-Achse), Markierung x-Achse: Messtage**

## Suprapermafrostwasser

Die zur Bestimmung des Suprapermafrostwassers im Untersuchungsgebiet installierten Pegelmessstellen ergaben keine verwertbaren Ergebnisse. Sie finden somit bei der Seewasserbilanzierung keine Verwendung. Grund hierfür könnte der zu tiefe Einbau in den Permafrost sein. Durch dessen teilweises Rückfrieren innerhalb der Messperiode konnten die vorher auf den atmosphärischen Druck geeichten Sensoren keine Druckerhöhung messen. Auch bei einer visuellen Beurteilung der Pegelstände in den Messstellen konnten keine Suprapermafrostwasser-Vorkommen nachgewiesen werden. Die Aufzeichnungen der Messstellen, welche sich auf der Hangfläche oberhalb der Gerinne befanden, waren ebenfalls wenig aussagekräftig. Hier wurden Wasserstände gemessen, die die Länge der Pegelrohre übertrafen. Die Fehlerquelle kann auch hier ein Rückfrieren des Permafrostes sein. Bei einer erneuten visuellen Begutachtung der Pegelrohre konnte ebenfalls kein anstehendes Suprapermafrostwasser beobachtet werden. Um dennoch eine Abschätzung des Eintrages treffen zu können, wurden die Ergebnisse der Bodenfeuchteuntersuchungen und die Messungen zur Auftautiefe des active layer im Einzugsgebiet des Thermokarstsees näher betrachtet. Die Prozentzahlen der Bodenfeuchteuntersuchungen werden in Tabelle 2 vorgestellt.

**Tabelle 2: gemessene Bodenfeuchten im Untersuchungsgebiet vor dem Regenereignis am 18.08.**

Lage	Bewuchs	Bodenfeuchte 10 cm	Bodenfeuchte 20 cm	Bodenfeuchte 30 cm	Bodenfeuchte 40 cm
östliches Plateau	Moos	35,6	38,3	42,8	Permafrost
östliches Ufer	Gras	40,6	40,2	41,9	39,5
südliches Ufer	Moos	53,3	54,4	52,1	Permafrost
südliches Ufer	Gras	52,5	49,8	50,5	49,1
südliches Ufer	Gras	47,3	46,3	47,2	44,6
Plateau I	Moos	52,2	50,3	45,7	Permafrost
Plateau II	Moos-Gras	70,1	66,5	51,1	38,4
westliches Ufer	Moos	51,6	46,1	40,1	Permafrost
südwestliches Ufer	Moos-Gras	42,4	43,9	50,3	Permafrost

Es zeigt sich, dass die gemessenen Gehalte der Bodenfeuchte in sich keine signifikanten Unterschiede aufweisen und sie entlang der Bodensäule ähnliche Werte einnehmen. Lediglich an der Messstelle Plateau II nimmt der Feuchtegehalt des Bodens mit zunehmender Bodentiefe entschieden ab. An diesem Standort wurde zudem mit 70,1 % der mit Abstand höchste Wert gemessen, was auf einen extrem feuchten Standort, zum Beispiel eine Senke im Gelände, hinweist. Alle weiteren Bodenfeuchtegehalte erreichen Werte von durchschnittlich 45 % und entsprechen somit nahezu gesättigten Bodenverhältnissen.

Die Messungen der Auftautiefe liefern die in Tabelle 3 dargestellten Ergebnisse in cm. Die einzelnen Messtage wurden dabei zum besseren Verständnis in Messkampagnen zusammengefasst.

**Tabelle 3: Darstellung der Auftautiefen im Untersuchungsgebiet, Messzeitraum 14.07. -26.08.**

Lage	Messkampagne*		
	Beginn	Mitte	Ende
südliches Ufer	16	21	23
südliches Ufer	16	22	23
südliches Plateau	12	16	21
östliches Plateau	17	21	26
östliches Plateau Gerinne I	18	22	25
östliches Plateau Gerinne II	16	19	23
westliches Plateau	16	-	24
westliches Plateau	14	-	23
westliches Ufer	17	-	25
westliches Ufer	23	-	27

Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass sämtliche gemessenen Auftautiefen des Permafrostes im Laufe der gewählten Zeitspanne nahezu übereinstimmende Größen erreichen. Die Werte der Auftaumächtigkeiten im Untersuchungsgebiet liegen am Anfang der Untersuchungen bei etwa 16 cm und erhöhen sich im Laufe der Messkampagne auf etwa 20 cm. Bis zum Ende der Untersuchungen werden Mächtigkeiten um die 24 cm gemessen. Auf Grund dieser Ergebnisse kann von einer Vergrößerung der active layer-Mächtigkeit von insgesamt etwa 8 cm ausgegangen werden. Mit Hilfe der Einzugsgebietsgrenzen des Thermokarstsees kann nun eine Wassermenge bestimmt werden, welche auf Grund der Tauprozesse im Sommer potenziell direkt dem See zufließen könnte. Auf Grund der hohen Eisgehalte im Yedoma Eiskomplex (bis zu 80 %) könnten Wassermengen von bis zu 40.000 m<sup>3</sup> entstehen. Allerdings wird das durch Tauprozesse anfallende Wasser bis zur vollständigen Sättigung des Bodens in der Bodenmatrix gebunden. Die Wassermengen, die lateralen Fließprozessen und damit einem direkten Zufluss in den Thermokarstsee zur Verfügung stehen, belaufen sich somit auf maximal 16.000 m<sup>3</sup>.

Hinzu kommt der Eintrag von Niederschlagswasser in das Einzugsgebiet des Thermokarstsees, welches potenziell ebenfalls als Suprapermafrostwasser dem See zufließen könnte. Die vom Ombrometer aufgezeichneten Niederschlagsmengen für Kurungnakh entsprechen bei Berücksichtigung des Einzugsgebietes von 0,5 km<sup>2</sup> einem totalen Eintrag von etwa 13.300 m<sup>3</sup>.

Demgegenüber stehen die Wassermengen, welche durch Verdunstungsprozesse aus dem Einzugsgebiet des Thermokarstsees ausgetragen werden. Im Allgemeinen ist die Verdunstung von Landflächen aufgrund des komplizierten Zusammenspieles aus Evaporation, Transpiration und Interzeption sowie unterschiedlicher Temperaturen und Bodenfeuchtegehalten sehr viel komplizierter zu bestimmen, als die über Wasserflächen. Insbesondere die individuellen Charaktereigenschaften der Vegetation, wie zum Beispiel Spaltöffnungszeiten, Wasserspeichervermögen, Blattoberfläche, Größe und Vorkommen, können Verdunstungsraten entscheidend beeinflussen.

Es kann davon ausgegangen werden, dass die tatsächlichen Verdunstungsraten über Landflächen im Untersuchungsgebiet auf Grund der größtenteils moosigen Vegetation mit ihrer großen Oberfläche nahezu den potenziellen Verdunstungsraten entsprechen können. Somit werden die über der Seefläche bestimmten Verdunstungsraten als maximal mögliche Quantitäten über dem Einzugsgebiet angenommen. Innerhalb der Einzugsgebietsgrenzen könnten bis zu 32.500 m<sup>3</sup> in die Atmosphäre transportiert werden. Abschließend werden die Ergebnisse in Tabelle 4 vorgestellt. Präsentiert werden soll dabei der Einfluss aller betrachteten Prozesse im Einzugsgebiet.

**Tabelle 4: Potenzielle Beiträge an einem Suprapermafrostwasser-Eintrag in den Thermokarstsee**

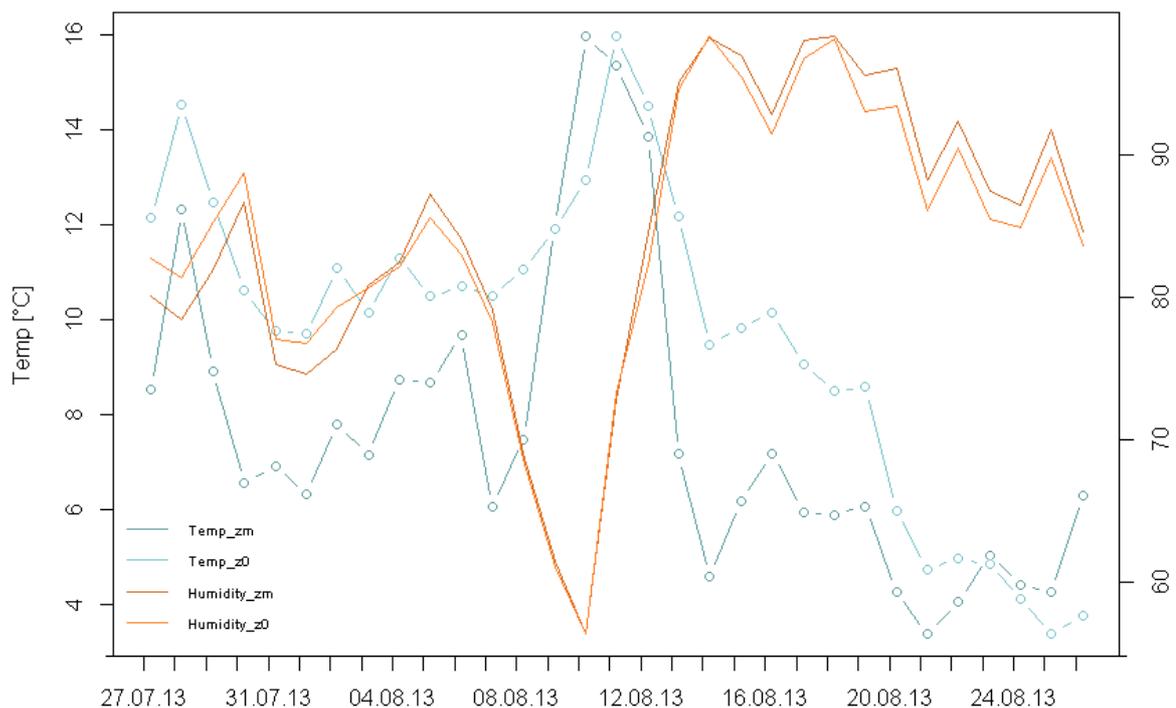
<b>Wassertransport im EZG</b>	<b>Grundlage</b>	<b>max. potenzielle Mengen [m<sup>3</sup>]</b>
Niederschlag	26,4 mm	13.300
Schmelzen des Permafrost	8 cm Mächtigkeit	16.000
Verdunstung	< 64.5 mm	32.250
<b>Suprapermafrostwasser-Vorkommen</b>	x	<b>0</b>

Die Tabelle 4 zeigt keinen deutlichen Hinweis auf einen Suprapermafrostwasser-Zustrom in den Thermokarstsee auf. Wasser, welches aus Niederschlagsereignissen oder durch Tauen des Permafrostes potenziell dem Thermokarstsee zufließen könnte, wird über Verdunstungsprozesse in die Atmosphäre transportiert.

## Verdunstung

Eine kontinuierliche Bestimmung der Verdunstung mit Hilfe der Schwimmlysimeter war während der Messperiode nicht möglich. Es zeigte sich, dass die Messgeräte, welche für den Einsatz in kleineren Gewässern vorgesehen sind, trotz Verankerung auf dem Seeboden nicht einsetzbar waren. Auf Grund ihrer Abmessungen von etwa 30 cm im Durchmesser und 7 cm in der Höhe, konnte auch bei niedrigem Wellengang im See ein Eintrag in die Lysimeter entstehen. Dieser verfälschte trotz zahlreicher Wiederholungen die Ergebnisse zur Verdunstungsbestimmung so stark, dass die Messungen nach mehrmaligem Scheitern eingestellt werden mussten.

Somit standen als Grundlage der Verdunstungsbestimmung die Wassertemperatur des Thermokarstsees sowie die Daten der meteorologischen Station auf Kurungnakh zur Verfügung. Diese speicherte Windgeschwindigkeiten und Lufttemperaturen in verschiedenen Höhen sowie die Gehalte der Luftfeuchtigkeit. Auch hier wurden die gemessenen Werte zu Tageswerten zusammengefasst. Auf Grund dieser Ausgangslage konnte eine Verdunstungsbestimmung, wie in Kapitel III beschrieben, herangezogen werden. Die gemessenen Daten für Luft- und Wassertemperatur sowie die Werte der Luftfeuchtigkeit sind in Abbildung 15 dargestellt.



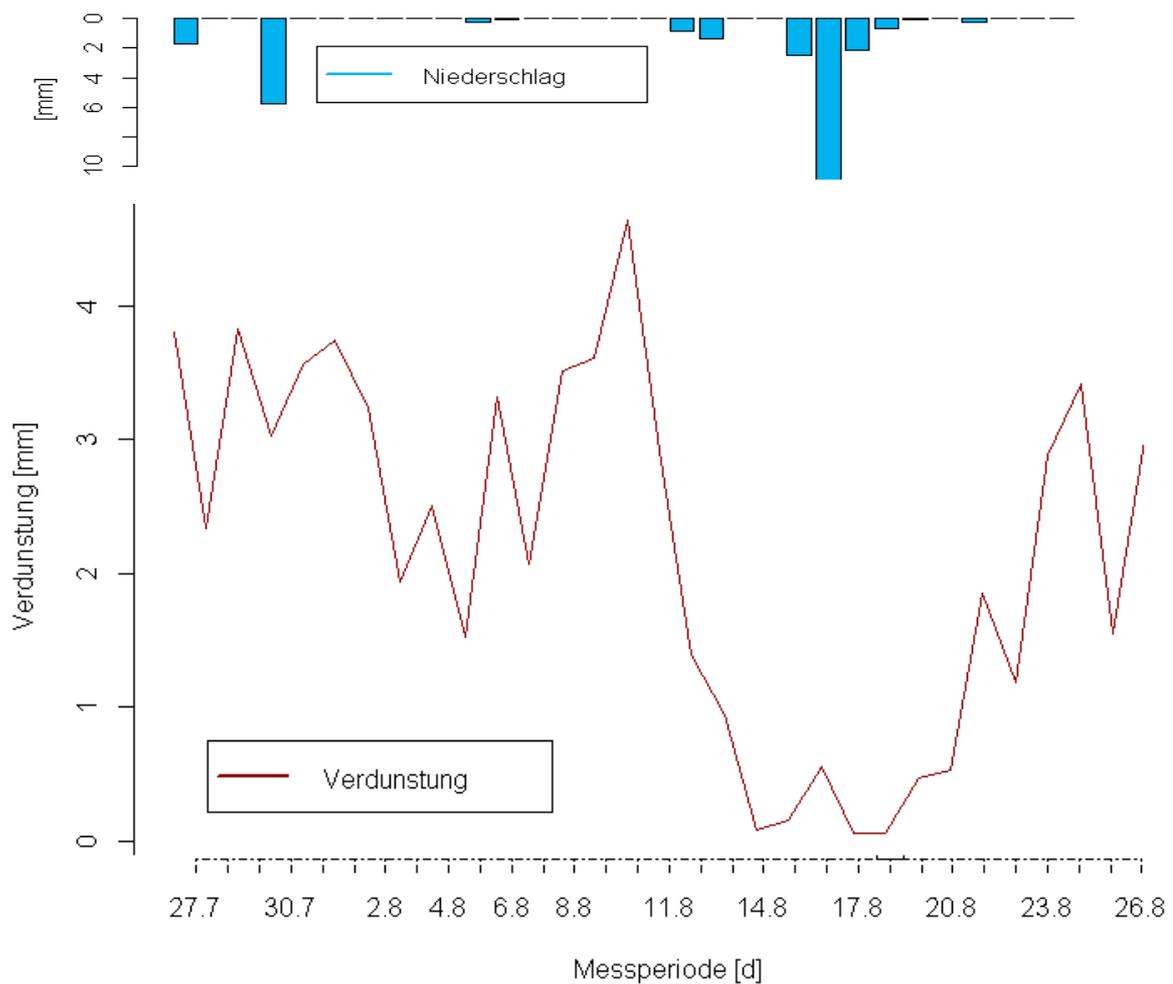
[d]  
Abbildung 15: Darstellung der Eingangsgrößen zur Verdunstungsbestimmung;  
Temperatur und Luftfeuchtigkeit

Zu Beginn der Messungen konnte eine Temperatur der Luft von 8,5 °C gemessen werden. Innerhalb von nur zwei Tagen stieg die Temperatur auf über 12 °C an. Nach einer anschließenden nahezu einwöchigen Periode mit gleichbleibend niedrigen Temperaturen um 8 °C, stellte sich ab dem 10.08. ein Maximum der Lufttemperaturen von bis zu 16 °C im Tagesmittel ein. Ab dem 12.08. fällt die Temperatur rasch auf nun etwa 7 °C im Mittel und verharrt bis zum Ende der Aufzeichnungen bei diesem Wert.

Eine vergleichbare Temperaturentwicklung kann bei den Messungen des Wasserkörpers beobachtet werden. Dieser hat aus dem Vormonat noch Restwärme gespeichert, der erste Messwert ergibt etwa 12 °C. Der Abfall der Lufttemperatur beeinflusst den Thermokarstsee nur bedingt, nach einem kurzen Anstieg auf über 14° C pendeln sich die Temperaturen um 10° C ein. Den Höchstwert während der Messperiode wird am 11.08. mit ebenfalls 16 °C im Tagesmittel festgehalten. Die danach stark fallenden Lufttemperaturen kühlen auch das Wasser des Sees mehr und mehr ab, es stellen sich bis zum 26.08. Wassertemperaturen um 6° C ein.

Die Aufzeichnungen der Luftfeuchtigkeit zeigen Werte, die während der Messperiode insgesamt leicht ansteigen. Ihr Mittel beträgt dabei etwa 80 %. Eine zwischenzeitliche Abnahme der Werte mit einem Minimum am 10.08. auf bis zu 60 % erhöht sich bis zum 13.08. auf nahezu 95 %.

Mit Hilfe der Datengrundlage der meteorologischen Station und den Temperaturen des Thermokarstsees konnten die Verdunstungsraten während der Messperiode bestimmt werden. Sie werden in Abbildung 16 dargestellt.



**Abbildung 16: Darstellung der Verdunstungsraten während der Messperiode und der entsprechenden Niederschlagsentwicklung**

Für die ersten vier Tage der Messperiode ergaben sich Verdunstungsraten von etwa 3,5 mm im Tagesmittel. Nach einem Einbruch bis zu knapp 2 mm erhöhten sich diese Werte wesentlich und erreichten am 10.08. ihren Maximalwert. Es konnten dabei knapp 5 mm Verdunstung im Tagesmittel bestimmt werden. Mit Beginn der Regenperiode am 11.08. und dem abrupten Abfall der Lufttemperatur auf nahezu 4 °C fallen die Verdunstungswerte auf beinahe 0 mm. Nach diesem Tiefpunkt pendelt sich die Verdunstungsrate bei anfänglichen 2–4 mm im Tagesmittel ein. Zusammenfassend ließ sich innerhalb des Untersuchungszeitraumes eine Verdunstungsmenge von 64,5 mm bestimmen, dies entspricht bei Berücksichtigung der Seefläche einem Wasservolumen von etwa 80.000 m<sup>3</sup>.

## Abfluss

Die durch den Radar-Höhensensor aufgezeichneten Werte repräsentieren den Wasserstand im Wehr. Die daraus bestimmten Abflussmengen im Gerinne werden zum besseren Verständnis ebenfalls zu Tageswerten zusammengefasst und in mm angegeben. Die Entwicklung der Abflussraten während der Messperiode ist in Abbildung 17 zu sehen. Der Abfluss betrug zu Beginn der Messungen 1,5 mm im Tagesmittel und nahm dann schnell ab. Schon am 31.07. wurden nur noch etwa 0,8 mm gemessen und am 14.08. konnten in einem vorläufigen Tiefpunkt nur noch etwa 0,2 mm erfasst werden. Mit Einsetzen des großen Regenereignisses kann ein Anstieg des Abflusses auf 0,4 mm beobachtet werden, welcher aber schon am 21.08. wieder bei nur knapp 0,2 mm liegt. Zum Ende der Messungen können kaum Veränderungen ausgemacht werden, die Abflussraten bewegen sich bei knapp 0,2 mm im Tagesmittel. Aufsummiert ergaben sich innerhalb des Messzeitraumes Abflussmengen von 18,4 mm oder 23.000 m<sup>3</sup>.

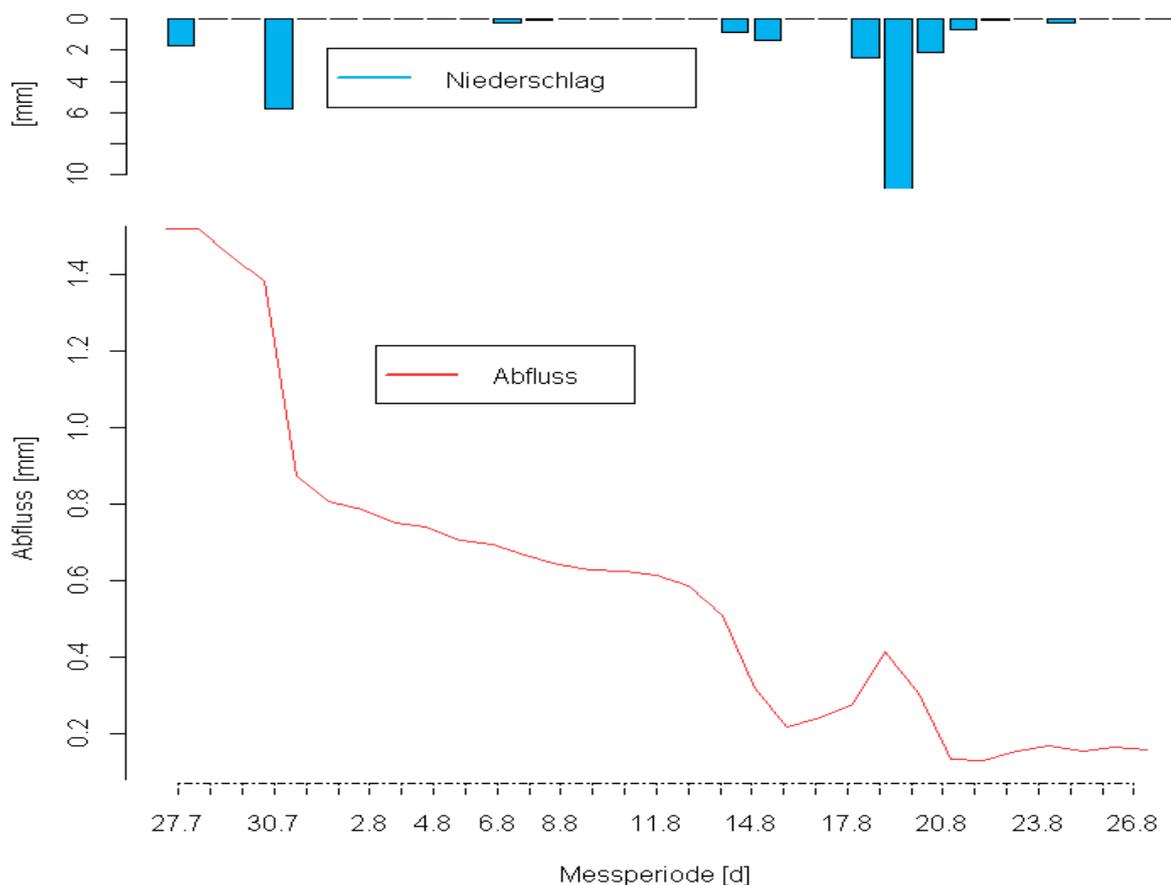


Abbildung 17: Darstellung der mit dem Radar-Höhensensor gemessenen Abflussraten

## Seespeicher

Die Aufzeichnungen zur Dynamik des Wasserspiegels im untersuchten Thermokarstsee ergaben die in Abbildung 18 gezeigten Ergebnisse. Man kann gut beobachten, dass der anfänglich im Randbereich des Sees gemessene Wasserstand von knapp 400 mm innerhalb der Messperiode nicht mehr erreicht wird. Der Wasserstand fiel relativ konstant bis zum 16.08. auf einen Tiefstwert von 360 mm. Zwischenzeitliche Spitzen können am 6.08. sowie am 13.08. ausgemacht werden und lagen bei knapp 380 mm sowie bei etwa 370 mm. Nach dem Regenereignisses am 18.08. mit seinem Maximalwert von 11 mm erhöht sich der Wasserstand im Thermokarstsee auf ein neues Hoch von 390 mm. Anschließend fällt er bis zum 26.08. auf 379 mm. Während der Messperiode fiel das Wasserlevel im See demnach um 21 mm; dies entspricht einem Wasservolumen von etwa 26.000 m<sup>3</sup>.

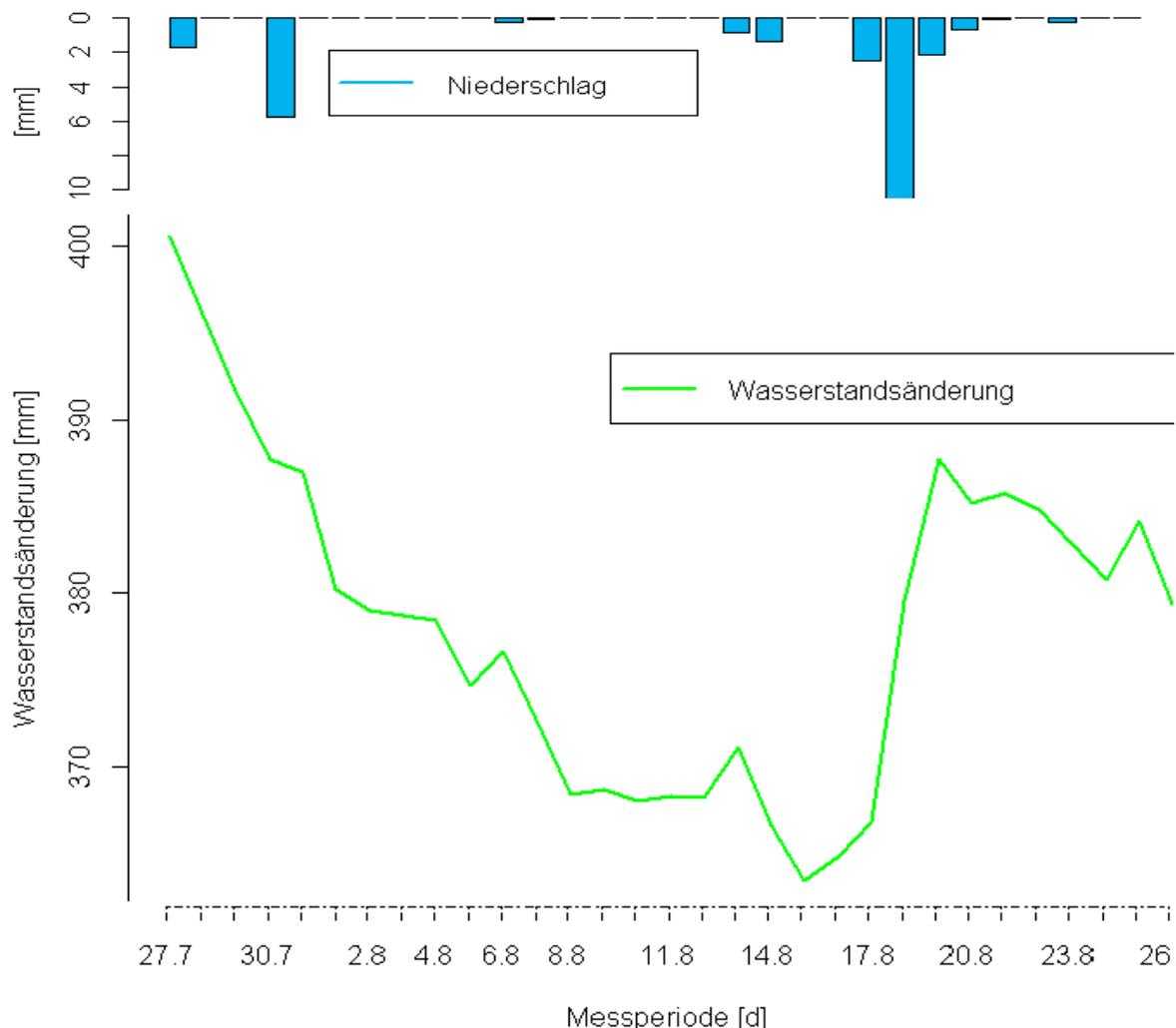


Abbildung 18: Darstellung der Seespeicheränderung während der Messperiode

## Zusammenfassung

Bei der Betrachtung einer Wasserbilanz, besonders bei der eines Thermokarstsees, ist es entscheidend, alle hydrologischen Prozesse zu betrachten. Nur das Zusammenspiel aus den Parametern Niederschlag, Zu- bzw. Ablauf, unterirdischer Zustrom, Evaporation und die Entwicklung des Wasservolumens während der Messperiode, lässt eine Beurteilung der hydrologischen Prozesse zu. Aus diesem Grund werden in Abbildung 19 die Ergebnisse direkt gegenübergestellt.

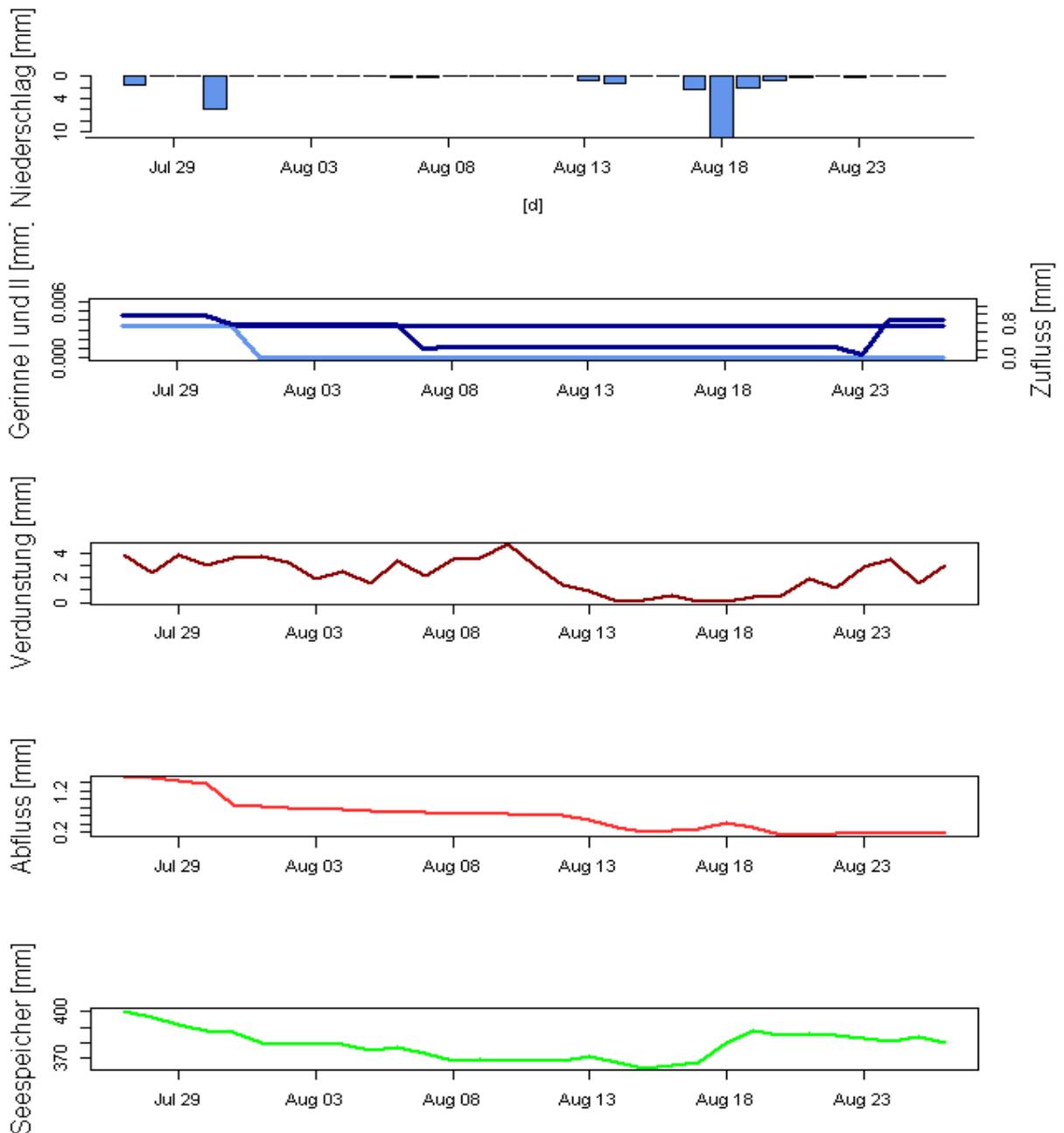


Abbildung 19: Darstellung aller ermittelten In- und Outputparameter der Seewasserbilanz sowie der gemessenen Wasserstandsänderung im See

Durch diese Darstellung der Ergebnisse kann man gut erkennen, dass die gemessenen Werte konsistent sind. Ausgehend davon, dass der Niederschlag als ein treibender Parameter angesehen werden kann, wird sein Einfluss direkt bei der Entwicklung des Seespeichers sichtbar. Dieser sinkt kontinuierlich, während kein bzw. wenig Niederschlag fällt. Weiterhin kann beim Einsetzen des Regenereignisses vom 18.08. unmittelbar eine Volumenvergrößerung des Wasserkörpers festgestellt werden. Ähnliche Entwicklungen können auch beim Zustrom des benachbarten Thermokarstsees beobachtet werden. Ein anfangs gemessener Höchstwert nimmt stark ab und erhöht sich mit einer zeitlichen Verzögerung. Ein Einfluss des Niederschlages auf den direkten Input über die Gerinne, welche eine Art Entwässerungsgraben für die anliegenden Flächen darstellen, kann nicht nachgewiesen werden. Niederschlags- sowie Schmelzwasser dieser Flächen konnte sich nur unwesentlich in den Gerinnen sammeln und dem Untersuchungsobjekt als direkter Input zufließen.

Bei den Abflusswerten kann der Einfluss des Niederschlages wieder gut beobachtet werden. Niederschlag, welcher zu Beginn der Messungen abregnet, vermindert den anfänglich rapiden Absturz der Durchflussmengen. Durch die einsetzenden Trockenzeiten sinken die Abflusswerte wieder stärker. Als Folge des großen Eintrages von Regenwasser am 18.08. kann wieder ein Anstieg der Abflussmengen festgestellt werden.

Sämtliche Entwicklungen sind darüber hinaus naturgemäß von den Verdunstungsraten beeinflusst. Wenn diese auf Grund der Temperaturspitzen während einer trockenen Periode ansteigen, werden große Mengen Seewasser in die Atmosphäre transportiert und sowohl der Wasserspiegel im See als auch die entsprechenden Zu- und Abflusswerte fallen.

In Tabelle 5 werden die Ein- bzw. Ausgangsgrößen der Seewasserbilanzierung in totalen Zahlen präsentiert und dabei als Volumen sowohl in  $m^3$  als auch in mm ausgewiesen. Diese Darstellung ermöglicht eine gute quantitative Beurteilung der einzelnen Parameter. Darüber hinaus zeigt sie die Differenz der betrachteten Parameter und somit die auf diesem Wege bestimmte Volumenänderung im See.

**Tabelle 5: Ergebnisse der Messkampagne vom 27.07. -26.08.,  
Input- und Outputmengen in totalen Zahlen**

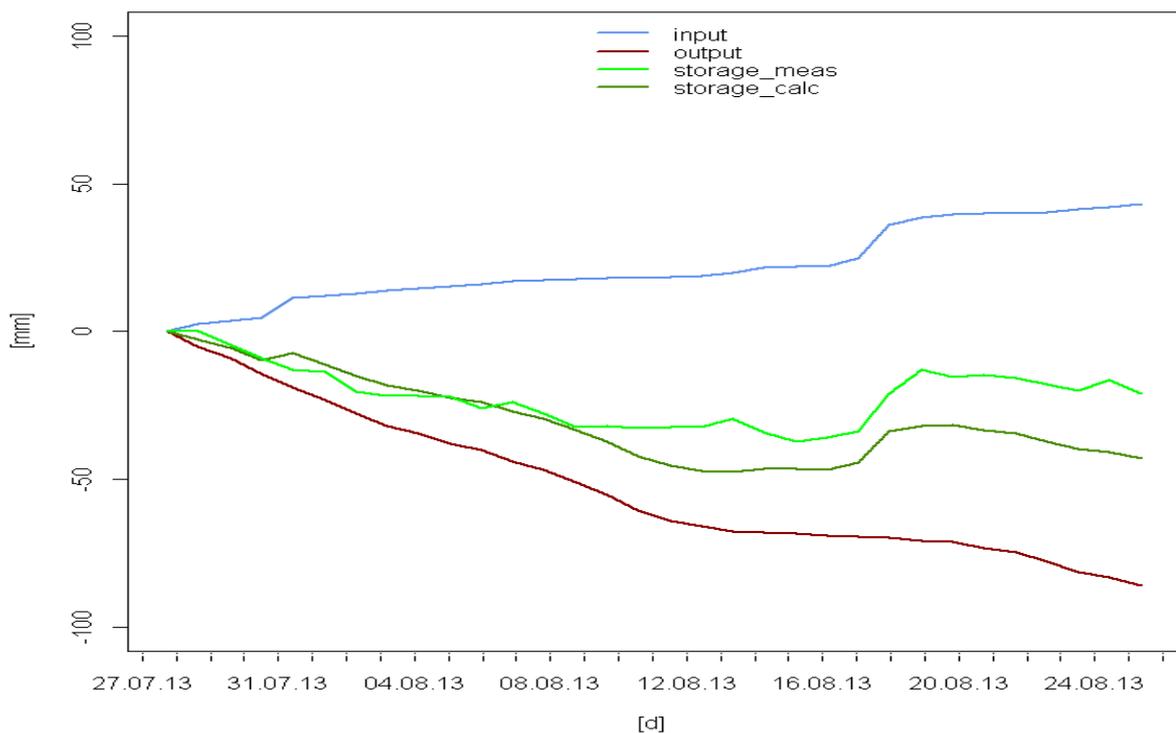
<b>Input</b>	<b>[m³]</b>	<b>[mm]</b>
Niederschlag	33.250	26,8
oberirdischer Zufluss	20.600	16,5
Suprapermafrostwasser	0	0
<b>Summe</b>	<b>53.850</b>	<b>43,3</b>
<b>Output</b>		
Verdunstung	80.000	64,5
Abfluss	23.000	18,5
<b>Summe</b>	<b>103.000</b>	<b>83,0</b>
<b>Theoretische Volumenänderung</b>	<b>- 49.150</b>	<b>- 39,7</b>
<b>Gemessene Volumenänderung</b>	<b>- 26.000</b>	<b>- 21,0</b>

Betrachtet man den totalen Input der Bilanz, fällt auf, dass Niederschlag den größten Anteil der eingehenden Wassermassen ausmacht. Gemessen wurden 26,8 mm, was bei der Fläche des Untersuchungsobjektes ein Volumen von 33.250 m³ ergibt. Der Zufluss über den Zustrom und die beiden Gerinne beläuft sich auf lediglich 16,5 mm bzw. 20.600 m³, wobei hier der Eintrag über den Zustrom mit 16,4 mm klar dominiert. Ein unterirdischer Wasserzufluss entlang der Permafrosttafel kann auf Grundlage der beschriebenen Ansätze nicht bestätigt werden. Somit ergeben sich für den kompletten gemessenen Input Mengen von 43,3 mm bzw. 53.850 m³.

Der Output wird von Verdunstungsprozessen dominiert. Diese ermöglichen, dass 64,5 mm bzw. etwa 80.000 m³ Wasser in die Atmosphäre transportiert werden. In der gleichen Zeitspanne strömen über den Abfluss nicht mehr als 18,5 mm bzw. 23.000 m³ aus dem Untersuchungsobjekt heraus.

Die Summe der Wassermassen, welche über die Outputparameter transportiert werden, beträgt somit 83 mm bzw. auf die Fläche des Thermokarstsees bezogen 103.000 m<sup>3</sup>. Aus diesen Ergebnissen ergibt sich für die Bilanzierung des Sees eine Differenz und somit eine theoretische Volumenänderung im See von -49.150 m<sup>3</sup> bzw. -39,7 mm während der Messperiode. Dem gegenüber steht eine gemessene Volumenänderung von -26.000 m<sup>3</sup> oder -21 mm.

In Abbildung 20 wurde zur kumulierten Darstellung der Input- und Outputmengen in mm die Entwicklung des gemessenen Wasserspiegels im See geplottet. Wie bereits in Kapitel III erwähnt, wird dabei nur eine Wasserstandsänderung betrachtet, welche eine Volumenänderung im Wasserkörper des Thermokarstsees darstellt. Zusätzlich wird die theoretische Volumenänderung im See, welche sich aus der Differenz der In- und der Outputparameter ergibt, abgebildet.



**Abbildung 20: Darstellung des Wasserlevels im Thermokarstsee während der Messperiode  
hellgrün: gemessener Seespeicher, dunkelgrün: berechneter Seespeicher,  
blau: kumulierter Input, rot: kumulierter Output**

Die Abbildung zeigt deutlich, dass sich der Speicher des Thermokarstsees im betrachteten Untersuchungszeitraum insgesamt verringert, da die Quantitäten des Outputs größer sind, als die des Inputs. Während der Messkampagne sinken die beiden dargestellten Verläufe der Wasserstandsänderung im See anfangs nahezu identisch. In der angesprochenen Trockenperiode, in welcher Temperatur und Verdunstung ihre Maximalwerte erreichen und kaum Niederschlag fällt, erreichen sowohl der gemessene Wasserstand im See als auch die berechneten Werte ihren Tiefststand. Erst mit Einsetzen des Regenereignisses am 18.08. ist bei beiden Graphen ein erneuter entscheidender Anstieg feststellbar. Im Anschluss an diesen ändert sich der Wasserstand im See nur noch unwesentlich.

Die beschriebenen Entwicklungen werden bei beiden Graphen beobachtet. Allerdings wird ebenfalls klar, dass sich die gemessene Volumenänderung bis zum Abschluss der Untersuchungen von der theoretischen Volumenänderung unterscheidet. Die ersten Unterschiede fallen schon vor dem 18.08. auf. Am 10.08. wurde eine eindeutig größere Wasserabnahme im See, um nahezu 50 mm, ermittelt. Die tatsächlichen Werte des Seespiegels (gemessene Werte) zeigen dagegen, dass der Wasserstand im See während der Trockenperiode nur um etwa 40 mm fiel.

Weitere Unterschiede zeigen sich bei den Entwicklungen nach dem Regenereignis am 18.08. Der gemessene Wasserstand erhöhte sich am 19.08. auf bis zu -15 mm bezogen auf den Ausgangswert des Seespiegels, während die errechneten Werte nur einen Anstieg im See auf bis zu -34 mm zeigen. Bis zum Abschluss der Messperiode am 26.08. stellt sich ein Unterschied der beiden Graphen zur Seespeicherentwicklung ein, welcher etwa 19 mm oder bezogen auf die Seefläche etwa 23.000 m<sup>3</sup> beträgt.

## V. Diskussion

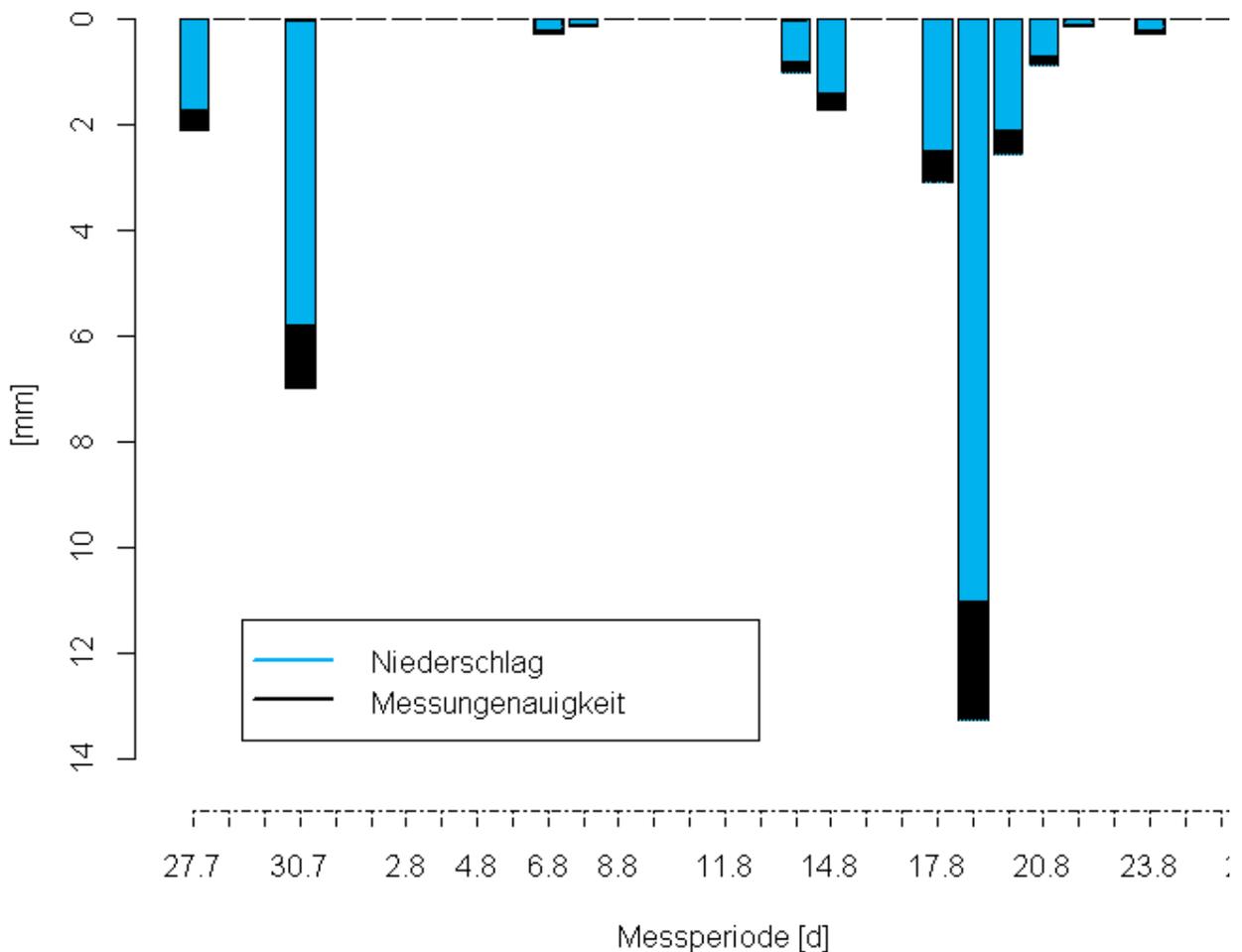
Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse der Seewasserbilanzierung diskutiert und damit eine noch aussagekräftigere Darstellung der hydrologischen Prozesse vor Ort geliefert. Die beschriebenen Resultate ergeben, wie in Tabelle 5 zusammenfassend aufgelistet und in Abbildung 20 dargestellt, eine Differenz zwischen der theoretischen und der gemessenen Volumenänderung im See von etwa 19 mm bzw. 23.000 m<sup>3</sup>. Es gilt nun zu klären, was die Ursachen für diese Diskrepanz sind. So werden die einzelnen Parameter der Wasserbilanz nochmals kritisch betrachtet und dabei auf die Unsicherheiten der einzelnen Bestimmungsmethoden eingegangen.

### Niederschlag

Ausschlaggebend für die Einschätzung der Messergebnisse des Niederschlages ist das Verständnis für die Messmethode und der damit verbundenen Fehlerpotenziale. Wie bereits erwähnt, können Ungenauigkeiten entstehen, wenn am Ende eines Niederschlagsereignisses eine Wippe mit Niederschlagwasser gefüllt ist, aber das einströmende Wasser nicht mehr ausreicht, um sie zu kippen. Die bereits aufgefangene Menge wird durch die ausbleibende Kippbewegung nicht registriert. Vielmehr ist sie nun Verdunstungsprozessen ausgeliefert oder wird bei erneutem Niederschlag fälschlicherweise diesem Ereignis zugerechnet. Dazu kommt, dass starke Winde den Eintrag in die Messvorrichtung stören und damit die aufgezeichneten Messwerte verfälschen können.

Die größten Unsicherheiten ergeben sich, da Niederschlagsmessungen mit einem Ombrometer punktuelle Messungen darstellen, welche die Niederschlagsverhältnisse genau für diesen Standort angeben. Werden punktuelle Messungen auf eine größere Fläche bezogen, werden Interpolationen akzeptiert, welche potenzielle Fehler verursachen. Niederschläge über einer Fläche können auf Grund komplexer und teils sehr kleinräumiger physikalischer Prozesse überaus heterogen fallen (Fitzjarrald, 1992).

In der Literatur werden zahlreiche Korrekturfaktoren zur Fehlerbehandlung von Niederschlagsmessungen benannt. Diese beziehen gerätebedingte sowie atmosphärische Abweichungen in die Niederschlagsermittlung ein (Legates, 1987; Sevruk, 1989). Darauf aufbauend halten Baumgartner et al. (1996) fest, dass tatsächliche Niederschlagswerte durch die Ergebnisse von Niederschlagsmessungen eher unterrepräsentiert werden und eine durch einen Ombrometer aufgezeichnete Messreihe Fehler von bis zu 20% haben kann. Für diese Arbeit ergibt dieser Ansatz die in Abbildung 21 gezeigten Abweichungen.



**Abbildung 21: Darstellung der Niederschlagswerte mit 20 %iger Messungenauigkeit**

Die Unsicherheiten könnten die gemessenen Niederschlagswerte um bis zu 3 mm pro Tag verfälschen. Aufsummiert ergibt sich somit während der Messperiode eine zusätzliche potenzielle Eintragsmenge von knapp 7.000 m<sup>3</sup>.

Diese Größenordnungen decken sich mit den Aufzeichnungen, welche in den Jahren 2008 auf der ebenfalls im Lena Delta liegenden Insel Samoilov ermittelt werden konnten. So können sowohl Boike et al. (2008) als auch Bornemann (2012) für den August Niederschlagsmengen von rund 30 mm für ihr nur wenige Kilometer entfernt liegendes Untersuchungsgebiet bestätigen. Ergebnisse aus den Jahren 2010 und 2011 liefern ebenfalls vergleichbare Niederschlagsmengen für diesen Teil des Lena Deltas (Boike et al., 2013). In Studien, welche Niederschlagsaufzeichnungen in amerikanischen und kanadischen Gebieten in der Arktis untersucht haben, werden durchschnittliche Niederschlagsmengen von 45 mm für den August angegeben (Woo et al., 1997; Woo et al., 2006).

## **Zufluss**

Die manuellen Messungen, welche einen direkten oberflächlichen Input in den Thermokarstsee quantifizieren sollten, konnten nicht kontinuierlich durchgeführt werden. Während der Messperiode wurden der Eintrag über die Gerinne sowie der Zustrom über den Wasserlauf jeweils fünf Mal beprobt. Dies ist für die dynamischen Prozesse vor Ort nicht ausreichend. Besonders Ereignisse, die während und nach dem Regenereignis vom 18.08. auftraten, konnten so nicht ausreichend genau erfasst werden. Es ist durchaus denkbar, dass die Zuflüsse auf Grund der Niederschlagsmengen vom 18.08. entschieden höher ausfielen.

Trotzdem war es möglich, einen Wassereinput über die verschiedenen Eintragswege auszumachen und diesen für die Messperiode grob quantitativ einzuordnen.

## Verdunstung

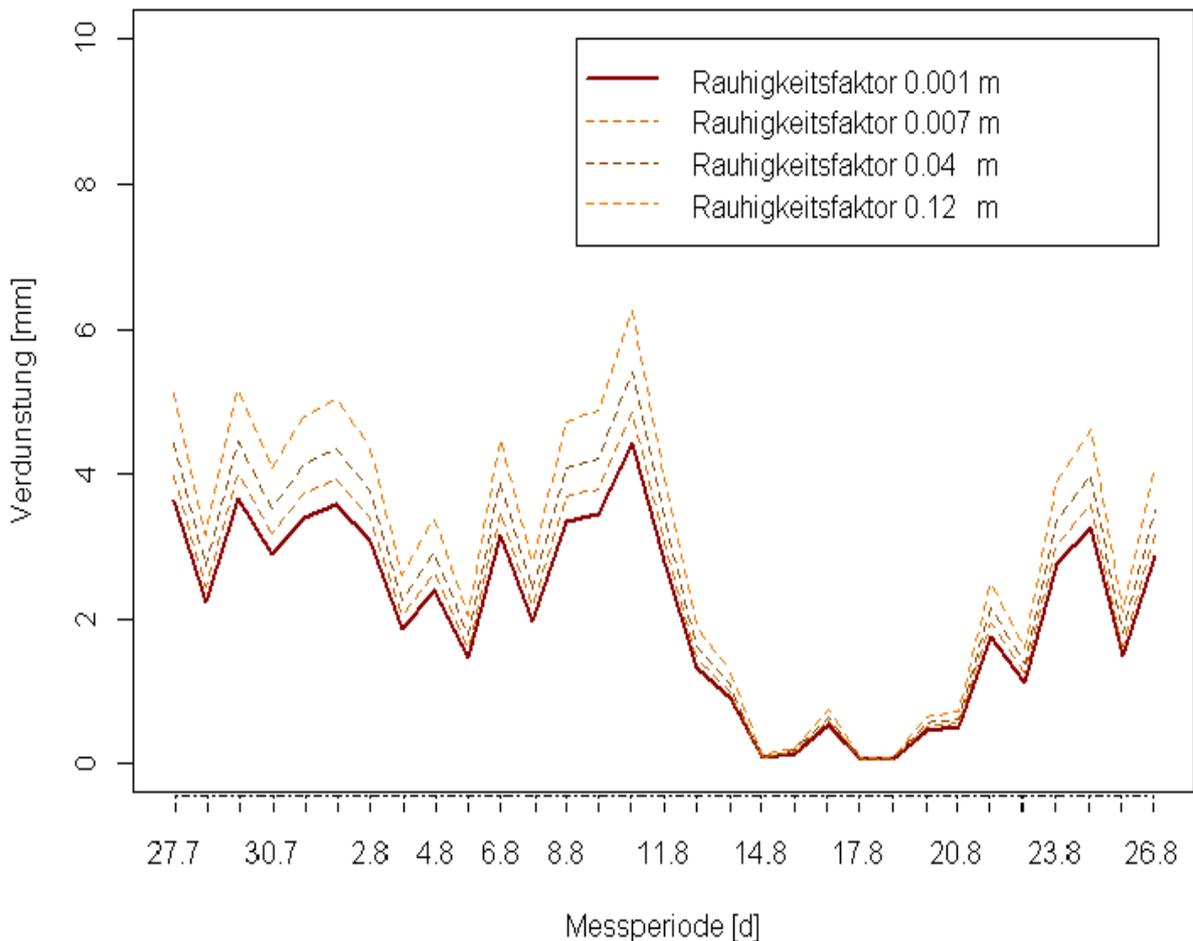
Die mit Abstand größten Wassermengen der Seewasserbilanz werden auf Grund von Verdunstungsprozesse aus dem Thermokarstsee „Lucky Lake“ in die Atmosphäre transportiert. Dies entspricht den Beschreibungen anderer arktischer Untersuchungsgebiete, welche ebenfalls hydrologische Untersuchungen betrachten (Lafleur, 1990; Souch et al., 1996; Mendez et al., 1998; Woo & Young, 2006; Kane et al., 2003;).

Bei der Ermittlung der Verdunstungsquantitäten war, neben der verwendeten Datengrundlage, die Bestimmung eines aerodynamischen Widerstandes nötig. Grundlage dafür ist der Rauigkeitsfaktor  $z_0$ , welcher das Verhältnis einer flachen Oberfläche zu einer durch Vegetation, Bebauung oder natürliche Erhebungen vergrößerten Oberfläche beschreibt. So finden sich in der Literatur zahlreiche Werte, die diese unterschiedlichen Oberflächenstrukturen beschreiben. In Tabelle 6 sind zur besseren Einschätzung einige Rauigkeitswerte aufgelistet (Zeller, 1981).

**Tabelle 6: Gegenüberstellung verschiedener Oberflächenstrukturen und ihrer entsprechenden Rauigkeitswerte (Zeller, 1981)**

Oberfläche	Rauigkeitsfaktor $z_0$ [m]
Wasseroberfläche (still)	0,0001
Asphalt, Beton, Fels, Eis	0,007
Rasen-/Feuchtstandorte	0,04
Wald, Strauchstandorte	0,12

Mit den verschiedenen Werten der Rauigkeit wurden ebenfalls die Verdunstungsrechnungen durchgeführt. Die dabei erzielten Ergebnisse werden in Abbildung 22 gezeigt.



**Abbildung 22: Darstellung der Verdunstungsentwicklung mit unterschiedlichen Rauhigkeitsfaktoren**

Man kann gut die Einflüsse der unterschiedlichen Oberflächenstrukturen auf die daraus resultierenden Verdunstungsmengen erkennen. Auf Grund der größeren Fläche, welche zum Beispiel ein Waldgebiet Verdunstungsprozessen anbietet, erhöhen sich bei Verwendung des entsprechenden Rauhigkeitswertes auch die Verdunstungsraten um bis zu 65 %. Schon bei minimalen Veränderungen des Rauhigkeitsfaktors können die so bestimmten Verdunstungswerte stark schwanken und somit die Ergebnisse der Seewasserbilanzierung verändern.

Garratt et al. (1994) entwickelten in ihrer Arbeit einen Rauigkeitsfaktor  $z_0$  für ruhige Wasseroberflächen von 0,0001 m. Dieser Ansatz konnte bei Muster et al. (2012) bei ihren Untersuchungen zur Verdunstung über wassergefüllten Senken in der arktischen Tundra erfolgreich bestätigt werden. Allerdings werden in jener Studie kleine Seen betrachtet, welche kaum vom Wind beeinflusst sind. „Lucky Lake“ dagegen stellt einen der flächenmäßig größten Wasserkörper auf Kurungnakh dar. Seine Oberfläche wird bei starken Winden aufgewühlt, daraus resultierender Wellengang führt zum Anstieg der entsprechenden Rauigkeitswerte und somit zu erhöhten Verdunstungsraten. Die Unterschiede der Verdunstungswerte können dabei, wie in Abbildung 22 ersichtlich teilweise bis zu 40 % betragen. Dies entspräche einem Anstieg der totalen Mengen auf insgesamt bis zu 110.000 m<sup>3</sup> oder etwa 90 mm, welche während der Messperiode in die Atmosphäre transportiert werden.

Betrachtet man die in dieser Arbeit bestimmten Verdunstungsraten über der Seefläche, erscheinen diese dennoch plausibel. In die Atmosphäre transportierte Mengen zwischen 4 mm und 6 mm im Tagesmittel konnten auch bei ähnlichen Untersuchungen ermittelt werden. Zieht man erneut die Nachbarinsel Samoilov für einen Vergleich heran, konnte Boike et al. (2013) für den August im Jahr 2008 Verdunstungsraten von bis zu 4 mm ermitteln. Für das Jahr 1999 wurden maximale Verdunstungswerte von bis zu 3,7 mm im Tagesmittel festgehalten. Ausnahmen bilden hier die Ergebnisse der Jahre 2003 und 2007, bei denen lediglich Verdunstungsmengen von 1,5 mm bzw. 1,7 mm erreicht wurden (Boike et al., 2008). In Untersuchungsgebieten der kanadischen Arktis werden Verdunstungsraten offener Wasserflächen von bis zu 4,4 mm im Tagesmittel erreicht (Roulet et al., 1986; Marsh et al., 1988).

## **Abfluss**

Dank eines ordnungsgemäßen Einbaus des Wehres vor Ort und der Verwendung des Radar-Höhensensors können die gemessenen Werte als solide bezeichnet werden. Trotzdem auftretende Messungenauigkeiten sind zum einen auf eine Messabweichung des Sensors zurückzuführen. Diese liegen laut Hersteller lediglich bei 0,3 % und können somit vernachlässigt werden.

Dazu kommen Einflüsse, welche die Wasseroberfläche im Wehr stören. So kann durch Wind initiiertes Wellengang im Wehr die Messungen des Radar-Höhensensors verfälschen.

Trotzdem spiegeln die Ergebnisse der Abflussmessungen glaubwürdig die Prozesse vor Ort wider. Entsprechend des sinkenden Seespiegels in „Lucky Lake“ und ausbleibender Niederschläge, sanken auch die gemessenen Abflusswerte. Auf das Regenereignis am 18.08. reagiert der Abfluss mit einem zwischenzeitlichen Anstieg. Danach sinkt der Abfluss schnell wieder und bis zum Ende der Messperiode werden immer geringere Abflusswerte gemessen. Ein in den Sommermonaten konsequent sinkender Abfluss eines Sees, welcher im weiteren Verlauf auch trocken fallen kann, konnte auch in Einzugsgebieten Nordamerikas sowie Westsibiriens beobachtet werden (Bowling et al., 2003).

## VI. Zusammenfassung

Die für die Seewasserbilanzierung von „Lucky Lake“ bestimmten Ein- und Ausgangsgrößen erlauben eine gute Bewertung der hydrologischen Prozesse während der vom 27.07. bis zum 26.08.2013 dauernden Messperiode. Die untersuchten Prozesse wurden dabei sowohl quantitativ als auch qualitativ betrachtet und die Interaktion der unterschiedlichen hydrologisch relevanten Einflussparameter erfasst und wiedergegeben.

Während der Messperiode gingen Niederschlagsmengen von 33.500 m<sup>3</sup> als direkter Eintrag über der Seefläche in die Bilanzierung ein. Dies entspricht einer Wassersäule von nahezu 30 mm während des einmonatigen Untersuchungszeitraumes. Diese Ergebnisse spiegeln damit die Resultate vorangegangener Untersuchungen wider, welche ebenfalls hydrologische Messungen im Lena Delta beinhalteten. (Boike et al., 2003; Boike et al., 2013; Langer et al., 2011; Bornemann, 2012). Weiterhin können Messungen in anderen arktischen Gebieten vergleichbare Niederschlagsmengen nachweisen. In Studien, welche Niederschlagsaufzeichnungen in amerikanischen und kanadischen Gebieten der Arktis ausgewertet haben, werden durchschnittliche Niederschlagsmengen von 45 mm für den August angegeben (Woo et al., 1997; Woo et al., 2006).

Zu den Niederschlagsmengen konnten weiterhin oberflächliche Zuflüsse über zwei Gerinne und einen Zustrom quantitativ eingeordnet werden. Zusammen flossen über diese Eintragswege Wassermengen von 23.000 m<sup>3</sup> in den Thermokarstsee.

Ein potenzieller unterirdischer Eintrag durch laterale Suprapermafrostwasser-Bewegungen innerhalb der Bodenmatrix konnte im Einzugsgebiet des Thermokarstsees auf Grundlage der verwendeten Annahmen ausgeschlossen werden. Durch die in den Boden eingetragene Wärme kann Permafrost zwar im Untergrund tauen und dabei Wasser aus der Bodenmatrix heraus gelöst werden; allerdings handelt es sich hierbei um geringe Mengen von etwa 16.000 m<sup>3</sup>, die – wenn überhaupt – nur minimal zu einem unterirdischen Zufluss in den Thermokarstsee beitragen.

Diese freigesetzten Wassermengen waren zum einen der Verdunstung im Einzugsgebiet des Thermokarstsees ausgeliefert und standen zum anderen der Vegetation im Untersuchungsgebiet für deren Metabolismus zur Verfügung. Darüber hinaus wurde über dem Einzugsgebiet gefallener Niederschlag größtenteils in der moosigen Vegetationsschicht zurückgehalten und lieferte somit keinen nennenswerten Beitrag an einer Suprapermafrostwasser-Anreicherung im getauten Untergrund. Dies deckt sich nicht mit den Untersuchungen von Bornemann (2012), welcher für die Seen auf Samoilov einen spätsommerlichen Suprapermafrostwasser-Eintrag nachwies. Ausschlaggebend hierfür sind die unterschiedlich großen Verhältnisse von Wasserfläche zum umgebenden Einzugsgebiet (Woo et al., 2006). Ganz im Gegensatz zum Untersuchungsgebiet auf Samoilov ist die Fläche des Einzugsgebietes von „Lucky Lake“ im Vergleich zur Seefläche viel geringer. Daraus folgt, dass auch potenzielle laterale Wasserbewegungen insgesamt deutlich kleinere Volumina ausmachen.

Der direkte Input des Niederschlages über der Seefläche stellt somit den quantitativ größten Parameter auf der Eintragsseite der Bilanzgleichung dar. Diese Folgerung bestätigte ebenfalls Kane et al. (1973). Hintergrund ihrer Untersuchungen sind Seewasserbilanzierungen für arktische Gebiete in Alaska, welche bestätigen, dass Niederschlag ein treibender Faktor bei den hydrologischen Prozessen innerhalb eines Einzugsgebietes ist.

Werden die Outputgrößen betrachtet, fällt besonders der Parameter Verdunstung auf. Über diesen konnten während der Messperiode, als Folge mehrere Anstiege der Lufttemperatur auf bis zu 16° C, der Transport eines Wasservolumens von etwa 80.000 m<sup>3</sup> in die Atmosphäre bestimmt werden. Die dabei erreichten Tagesmittelwerte von bis zu 4,3 mm sind mit Studien anderer arktischer Gebiete vergleichbar. Boike et al. (2008, 2013), Langer et al., (2011), Roulet et al. (1986) und Marsh et al. (1988) veröffentlichten Verdunstungswerte zwischen 1,7 mm und 4,9 mm für Untersuchungsgebiete sowohl im Lena Delta, als auch in arktischen Gebieten Alaskas.

Weiterhin kam es zu einem Wasseraustrag des Thermokarstsees über einen oberflächlichen Strom. Über diesen drainiert während der Messperiode ein Wasservolumen von etwa 23.000 m<sup>3</sup> in die Lena. Da während der Messperiode die ausgetragenen Wassermassen mit 103.000 m<sup>3</sup> insgesamt größer waren als die eingetragenen Mengen von 53.850 m<sup>3</sup>, nimmt der Wasserspiegel und somit das Volumen des Thermokarstsees „Lucky Lake“ während der Messperiode ab.

Die Ergebnisse der hier gezeigten Studie zeigen deutlich auf, dass das Verhältnis aus Niederschlagsmengen und gleichzeitig über Verdunstungsprozesse ausgetragener Wassermassen maßgeblich die hydrologische Situation im Untersuchungsgebiet steuert. Diese Dominanz der vertikalen Transportwege im hydrologischen Kreislauf arktischer Gebiete wurde ebenfalls von Woo et al. (2006) belegt. Als Folge der Diskrepanz zwischen Input- und Outputmengen kann ein Austrocknen des Thermokarstsees in den nächsten Jahren nur dann ausgeschlossen werden, wenn entweder die entsprechenden Niederschlagsmengen die immensen Verdunstungsraten während der Sommermonate ausgleichen können, oder aber die durch Schmelzvorgänge im Frühling eingetragenen Wassermengen ausreichen, den Volumenverlust auszugleichen. Die Bedeutung des Auffüllens eines Wasserkörpers durch einsetzende Schneeschmelze konnte sowohl von Rovanssek et al (1996) als auch von Bowling et al (2003) in weiteren arktischen Gebieten Alaskas untermauert werden. Karlsson et al. (2011, 2012, 2013) veröffentlichten eine Analyse der Thermokarstseen für arktische Untersuchungsgebiete in Russland. Untersucht wurden mit Hilfe von Satellitenaufnahmen die Summe aller Flächen der Thermokarstseen sowie die Anzahl der Wasserkörper im jeweiligen Untersuchungsgebiet zwischen den Jahren 1973 - 2009. Es konnte nachgewiesen werden, dass kein wesentlicher Trend festzustellen war. Es gab Jahre, in denen sowohl eine Abnahme der totalen Seefläche als auch eine sinkende Anzahl der Wasserkörper im Untersuchungsgebiet festgestellt wurde. Allerdings konnten diese Verluste größtenteils ausgeglichen werden. Dies weist zusätzlich darauf hin, dass eine Betrachtung der hydrologischen Prozesse in arktischen Untersuchungsgebieten durch eine mindestens ganzjährige Messkampagne repräsentiert werden sollte.

Die Differenz der Volumenänderung zwischen den gemessenen und den theoretischen Werten lässt sich nicht endgültig einem Bestimmungsverfahren der hydrologischen Parameter der Seewasserbilanz zuschreiben; vielmehr ergibt sich diese Differenz aus dem Zusammenspiel unterschiedlicher Faktoren. Zum einen ist die Ungenauigkeit des jeweiligen Messprinzipes und des daraus resultierenden Bestimmungsverfahrens wesentlich für die Ergebnisverzerrungen verantwortlich. Ganz besonders das Verfahren zur Ermittlung der Verdunstungsraten enthält ein Unsicherheitspotenzial, welches 40 % erreichen kann. Hinzu kommen die beschriebenen Unsicherheiten bei der Niederschlagsbestimmung, die zusätzliche Bilanzierungsunterschiede von bis zu 20 % ausmachen können.

Besonderes Augenmerk muss des Weiteren auf die Entwicklungen nach dem Regenereignis am 18.08. geworfen werden. Es ist nicht ausgeschlossen, dass der Eintrag über die Gerinne während dieses Zeitraumes entschieden höher ausfiel. Auch ein quantitativ größerer Eintrag über den Zustrom aus dem benachbarten Thermokarstsee ist möglich. Der parallel gemessene Abfluss aus dem See lässt eine dementsprechende Interpretation zu, da dieser mit erhöhten Durchflussmengen auf das angesprochene Regenereignis reagierte.

Darüber hinaus könnten diffuse Einträge entlang der Uferverläufe für die Differenz zwischen gemessener und theoretischer Volumenänderung im Thermokarstsee verantwortlich sein und somit einen zusätzlichen Eintrag in den Wasserkörper ausmachen. Die am Uferhang teilweise offen exponierten Flächen des Yedoma-Eiskomplexes sind bei direkter Sonneneinstrahlung unmittelbar Tauprozessen ausgeliefert. Wie viel Wasservolumen auf Grund dieser kaum messbaren Vorgänge in den See gelangen, lässt sich nur schwer abschätzen und bedarf einer genaueren Betrachtung. Allerdings ist ein großflächiger Eintrag entlang diesen Flächen durchaus denkbar.

Abschließend haben sowohl die Messungenauigkeiten der verwendeten Sensoren als auch gewählte Annahmen und Näherungen bei der Bestimmung der Ergebnisse ihren Einfluss auf die endgültigen totalen Zahlen der Seewasserbilanzierung.

## VII. Folgerung

Das Ziel dieser Arbeit, eine Seewasserbilanz für den Thermokarstsee „Lucky Lake“ aufzustellen, welche die wesentlichen hydrologischen Prozesse im Sommer erfasst, wurde erfüllt. Dazu wurden die Parameter Niederschlag, unterirdischer Eintrag, oberflächliche Zu- und Abflüsse, Verdunstung sowie die Volumenänderung des Sees während der Messperiode vom 27.07. bis 26.08.2013 sowohl quantitativ erfasst als auch qualitativ eingeordnet. Es wurde nachgewiesen, dass der Volumenverlust von „Lucky Lake“ vordergründig auf die hohen Verdunstungsraten während der Messperiode zurückzuführen ist. Sämtliche dem Thermokarstsee zufließenden Wasserströme reichten nicht aus, den Wasserverlust auszugleichen, welcher sich auf Grund von Verdunstungsprozessen einstellte.

Weiterhin wird es mit Hilfe der erhobenen Daten möglich sein, eine Modellierung der aktuellen hydrologischen Prozesse zu realisieren. Auf Grundlage dieses Modells sollen in einem weiteren Schritt die Entwicklungen des gegenwärtigen Klimawandels in der russischen Arktis realistisch prognostiziert werden können. So werden die in dieser Arbeit gewonnenen Daten helfen, Antworten auf wichtige Fragen verschiedenster Wissenschaften zu finden. Diese könnten zum Beispiel lauten:

- Wie umfassend wird der gegenwärtige Klimawandel die Umwelt in der russischen Arktis verändern?
- Wie viel Permafrost wird in den nächsten Jahren oder Jahrzehnten tauen?
- Wie viel im Permafrost gebundener Kohlenstoff kann dabei auf Grund von Tauprozessen mineralisiert oder mobilisiert werden?
- Welche Folgen haben veränderte Niederschlagsverhältnisse auf die Hydrologie und damit auf die empfindlichen Ökosysteme in der Arktis?
- Welche Maßnahmen können ergriffen werden, um in den betroffenen Gebieten potenzielle Gefahren für die Infrastruktur zu minimieren?
- Was könnten diese Maßnahmen kosten?

Um zukünftige Forschung im Untersuchungsgebiet zu verbessern, wäre es angebracht, weitere Niederschlagsmessstationen im Untersuchungsgebiet zu installieren. Eine noch genauere Bestimmung der über Niederschlagsereignisse eingetragenen Wassermengen ist auf Grund der quantitativen Dominanz dieses Parameters ratsam.

Auch eine genauere Bestimmung der Verdunstungsraten ist empfehlenswert. Die Unsicherheiten der Ergebnisse, welche sich auf Grund der angewandten Methodik ergeben, können hohe Ausmaße annehmen. Idealerweise sollte in einer weiteren Untersuchungskampagne eine Eddy-Kovarianz-Station direkt auf dem Thermokarstsee installiert werden, welche direkt vor Ort den Energie-, Wasser- und Spurengasaustausch zwischen der Oberfläche und der bodennahen Atmosphäre messen kann. Mit den so gewonnen Daten könnten Prinzipien zur Verdunstungsbestimmung genutzt werden, welche zusätzlich zu Temperaturdaten, Gehalten der Luftfeuchtigkeit sowie Windgeschwindigkeiten die Energiebilanz der Oberfläche einbezieht und somit genauere Ergebnisse liefern können.

Zusätzlich wäre eine nähere Betrachtung diffuser Einträge an den Uferkanten interessant. Die über diese Pfade in den Thermokarstsee gelangten Wassermengen könnten ein größeres Volumen einnehmen als bekannt und somit die Seewasserbilanz entscheidend beeinflussen.

Darüber hinaus ist für das Abbilden eines kompletten hydrologischen Zyklus eine Erfassung der im Frühjahr über Schmelzprozesse freigesetzten Wassermengen notwendig. Das auf diesem Weg in „Lucky Lake“ eingetragene Wasser stellt eine wichtige Eintragsgröße bei einer ganzjährlichen quantitativen Betrachtung der hydrologischen Prozesse vor Ort dar. Die so eingetragenen Mengen könnten den sommerlichen Volumenverlust im Thermokarstsee mindern oder gar zu einer ausgeglichenen jährlichen Seewasserbilanzierung führen. Nur über mindestens jährliche Betrachtungszeiträume ist es somit möglich, den Einfluss des gegenwärtigen Klimawandels auf den Thermokarstsee „Lucky Lake“ hinreichend interpretieren zu können. Das Identifizieren von hydrologischen Prozessen, welche besonders stark auf zukünftige Entwicklungen reagieren und weitere Veränderungen der Ökologie sowohl regional als auch global auslösen könnten, ist entscheidend.

## Literaturverzeichnis

- Arctic Climate Impact Assessment. 2004. Impacts of a Warming Arctic: Arctic Climate Impact Assessment Report. 2004.
- Arctic Climate Impact Assessment. 2005. Impacts of a Warming Arctic: Arctic Climate Impact Assessment Report. 2005.
- Arctic Monitoring and Assessment Programm. 2011. Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic (SWIPA): Climate Change and the Cryosphere. 2011.
- Baumgartner, A., Liebscher, H.-J. 1996. Quantitative Hydrology. Lehrbuch der Hydrologie I. 1996.
- Boike, J., Kattenstroth, B., Abramova, K., Bornemann, N., Chetverova, A., Fedorova, I., Fröb, K., Grigoriev, M., Grüber, M., Kutzbach, L., Langer, M., Minke, M., Muster, S., Piel, K., Pfeiffer, E.-M., Stouf, G., Westermann, S., Wischnewski, K., Wille, C., and Hubberten, H.-W. 2013. Baseline characteristics of climate, permafrost and land cover from a new permafrost observatory in the Lena River Delta, Siberia (1998–2011), *Biogeosciences*, 10, pp. 2105-2128, doi:10.5194/bg-10-2105-2013. 2013.
- Boike, J., Wille, C., Abnizova, A. 2008. Climatology and summer energy and water balance of polygonal tundra in the Lena River Delta, Siberia. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 113. 2008.
- Bornemann N. 2012. Wasserbilanz eines arktischen polygonalen Tundra-Standortes. 2012.

- Bowling, L. C., Kane, D. L., Giech, R. E., Hinzman, L. D. 2003. The role of surface storage in a low-gradient Arctic watershed. *Water Resources Research* 39. 2003.
- Brown, J., Ferrians, Jr., O. J., Heginbottom, J. A. and Melnikov, E. S. 1998. Circum-arctic map of permafrost and ground ice conditions. US Geological Survey Circum-Pacific Map Series. 1997.
- CAVMteam. 2003. Circumpolar Arctic Vegetation Map. (1:7,500,000 scale), Conservation of Arctic Flora and Fauna (CAFF) Map No. 1. Anchorage: U.S. Fish and Wildlife Service, 2003.
- Correll, R., Prestrud, P., Weller, G. 2004. *Impacts of a Warming Climate*. Cambridge University Press. 2004.
- Euskirchen, S. E., McGuire, A. D. and Chapin, F. S. 2007. Energy feedbacks of northern high-latitude ecosystems to the climate system due to reduced snow cover during 20th century warming. *Global Change Biology* 13, pp. 2425–2438. 2007.
- Fedorova, I., Bolshiyarov, D., Chetverova, A., Makarov, A., Tretiyakov, M. 2013. Measured water discharges, suspended supply and morphometric parameters of cross-sections in the Lena River Delta during summer period 2002-2012. doi:10.1594/PANGAEA.808854. 2013.
- Fitzjarrald, D. R., & Moore, K. E. 1992. Turbulent transport over tundra. *Journal Of Geophysical Research* 97, pp. 16,717-16,729. 1992.
- French, H. M. 2007. *The Periglacial Environment*. Großbritannien: WILEY Vol. III. 2007.

- Garratt, J. R. 1994. *The Atmospheric Boundary Layer*. Cambridge University Press. 1994.
- Grigoriev, M. N. 1993. Cryomorphogenesis of the Lena River mouth area. SB RAS, pp. 176. 1993.
- Guan, X. J., Spence, C., and Westbrook, C. J. 2010. Shallow soil moisture - ground thaw interactions and controls - Part 2: Influences of water and energy fluxes. *Hydrology and Earth System Science* 14, pp. 1387–1400. 2010.
- Günther, F. 2009. Investigation of thermokarst evolution in the southern Lena Delta using multitemporal remote sensing and field data. 2009.
- Günther, F., Overduin, P. P., Sandakov, A. V., Grosse, G., Grigoriev M. N. 2013. Short- and long-term thermo-erosion of ice-rich permafrost coasts in the Laptev Sea region. *Biogeoscience* 10, pp. 4297-4318. 2013.
- Hall J. V., Frayer, W. E., Wilen B. O. 1994. *Status of Alaska Wetlands*. US Fish and Wildlife Service. 1994.
- Hinzmann, L. D., Kane D. L., Gieck R. 1991. Hydrologic and thermal properties of the active layer in the Alaskan Arctic. *Cold Regions Science and Technology* 19. 1991.
- Karlsson, J. M., Bring, A., Peterson, G. D., Gordon, L. J., Destouni, G. 2011. Opportunities and limitations to detect climate-related regime shifts in inland Arctic ecosystems through eco-hydrological monitoring. *Environmental Research Letters* 6. 2011.

- Karlsson, J. M., Lyon, S. W., Destouni, G. 2012. Thermokarst lake, hydrological flow and water balance indicators of permafrost change in Western Siberia. *Journal of Hydrology*, pp. 464-465. 2012.
- Karlsson, J. M., Lyon, S. W., Destouni, G. 2014. Temporal behavior of lake size-distribution in a thawing permafrost landscape in northwestern Siberia. *Remote Sensing* 6, pp. 621-636. 2014.
- Kane, D. L., Gliock, R. E., Bowling, L. C. 2003. Impacts of Surficial Permafrost landforms on Surface Hydrology. *Proceedings in the Eight International Conference on Permafrost*, pp. 507-511. 2003.
- Lachenbruch. 1962. Mechanics of thermal contraction cracks and ice-wedge polygons in permafrost. *Geological Society of America, Special Papers 70*, pp. 1-69. 1962.
- Lachenbruch A. H., Marshall, B. V. 1986. Changing climate: geothermal evidence from permafrost in the Alaskan Arctic. *Science* 234, pp. 689–696. 1986.
- Lafleur P. M. 1990. Evaporation From Wetlands. *The Canadian Geographer* 34, pp. 79-82. 1990.
- Langer, M., Westermann, S., Muster, S., Piehl, K., Boike, J. 2011. The surface energy balance of a polygonal tundra site in northern Siberia - Part 2: Winter. *The Cryosphere* 5, pp. 509-524. 2011.
- Legates, D. R. 1987. A climatology of global precipitation. *Climatology* 40. 1987.
- Lexikon der Geowissenschaften. 2000. Heidelberg: Spektrum Vol. II, Akademischer Verlag Heidelberg, p. 326. 2000.

- Magnuson, J., Robertson, D., Son, B., Wynne, R., Livingstone, D., Arai, T., Assel, R., Barry, R., Card, V., Kuusisto, E., Grannin, N., Prowse, T., Steward, K., Vuglinski, V. 2000. Historical trends in lake and river ice cover in the northern hemisphere. *Science* 289, pp. 1743–1746. 2000.
- Marsh, P., Bigras, S. C. 1988. Evaporation from Mackenzie delta lakes. *Arctic and Alpine Research* 20, pp. 220-229. 1988.
- Mendez, J., Hinzman, L. D., Kane, D. L. 1998. Evapotranspiration from a Wetland Complex on the Arctic Coastal Plain of Alaska. *Nordic Hydrology* 29, pp. 303-330. 1998.
- Morgenstern, A., Grosse, G., Arcos, D. R., Günther, F., Overduin, P. P., Schirrmeister, L. 2012. The role of thermal erosion in the degradation of Siberian ice-rich permafrost. *Journal Of Geophysical Research - Earth Surface*. 2012.
- Muster, Langer, M., Heim, B., Westermann, S., Boike, J. 2012. Subpixel heterogeneity of ice-wedge polygonal tundra: a multi-scale analysis of land cover and evapotranspiration in the Lena River Delta, Siberia. *Tellus* 64, doi:10.3402/tellusb.v64i0.17301. 2012.
- Nelson, F. E., Anisimov, O. E. and Shiklomonov, O. I. 2001. Subsidence risk from thawing permafrost. *Nature* 410, pp. 889– 890. 2001.
- Nicholson, S. E., Yin, X., 2000. On the feasibility of using a lake water balance model to infer rainfall: an example from Lake Victoria,. *Hydrological Sciences Journal* 45, pp. 75-95. 2000.
- Parry, M. L., Rosenzweig, C., Iqbal, A., Livermore, M., Fischer, G. 2004. Effects of climate change on global food production. *Global Environment Change*. 2004.

- Paul, F., Kääb, A., Maisch, M., Kellenberger, T., Haerberli, W. 2004. Rapid disintegration of Alpin glaciers observed with satellite data. *Geophysical Research letters*, 2004.
- Quinton, W., Marsh, P. 1999. A conceptual framework for runoff generation in a permafrost Environment. *Hydrol Process*, pp. 2563–2581. 1999.
- Rosenberry, D. O., Winter, T. C., Busco, D. C., Likens, G. E.. 2007. Comparison of 15 evaporation methods applied to a small mountain lake in the northeastern USA. *Journal of Hydrology*, pp. 149– 166. 2007.
- Roulet, N. T., Woo, M. K. 1986. Wetland and lake evaporation in the low Arctic. *Arctic and Alpine Research* 18, pp. 195-200. 1986.
- Rovaneck, R. J., Hinzman, L. D., Kane, D. L. 1996. Hydrology of a tundra wetland complex on the Alaskan Arctic Coastal Plain. *Arctic and Alpine Research* 28, pp. 311-317. 1996.
- Sazonova, T. S., Romanovsky, V. E., Walsh, J. E., Sergueev, D.O. 2004. Permafrost dynamics in the 20th and 21st centuries along the East Siberian transect. *Journal Of Geophysical Research* 109. doi:10/1029/2003JD003680. 2004.
- Selkregg, L. L. 1975. *Alaska Regional Profile Vol. 2: Arctic Region State of Alaska*. Office of the Governor. 1975.
- Serreze, M. C., Francis, J. A. 2006. The Arctic amplification debate. *Climatic Change* 76, pp. 241–264. 2006.
- Sevruk, B. 1989. Reliability of precipitation measurements. 1989.

- Soloviev, P. A. 1973. Alas of Thermokarst relief of central Yakutia. 1973.
- Souch, C., Wolfe, C. P., Susan, C., Grimmond, B. 1996. Wetland evaporation and energy partitioning. *Journal Of Hydrology* 184, pp. 189–208. 1996.
- Tarnocai, C., Zoltai, S. C. 1988. Wetlands of Arctic Canada. *Ecological Land Classification Series No. 24. Environment Canada Polysciences Publications Inc*, pp. 29-53. 1988.
- Thompson, E., Davis, M. 2002. Kilimandscharo Ice Core records: Evidence of Holocene Climate Change in Tropical Afrika. *Science* 298, 2002.
- Walsh, J. E. 2008. Climate Of The Arctic Marine Environment. *Ecological Society of America: Ecological Applications* 18, pp. 3-22. 2008.
- Wille, C., Kutzbach, L., Sachs, T., Wagner, D., Pfeiffer, E.-M. 2008. Methan emission from Siberian arctic polygonal tundra: Eddy covariance measurements and modelling. *Global Change Biology* 14, pp. 1395-1408. 2008.
- Woo, M. K., Young, K. L. 1997. Hydrology of a small drainage basin with polaroasis environment. *Permafrost and Periglacial Processes* 8, pp. 257-277. 1997.
- Woo, M. K., Guan, X. J. 2006. Hydrological connectivity and seasonal storagechange of tundra ponds in a polar oasis environment, Canadian High Arctic. *Permafrost and Periglacial Processes* 17, pp. 309–323. 2006.
- Woo, M. K., Kane, D. L., Carey, S. K., Yang, D. 2008. Progress in Permafrost hydrology in the new millennium. *Permafrost Periglac*, pp. 237-254. 2008.

- Yang, D., Kane, D. L., Hinzman, L. D., Zhang, X., Zhang, T., Ye, H. 2002. Siberian Lena River hydrologic regime and recent change. *Journal Of Geophysical Research* 107. 2002.
- Zeller, J., 1981. Starkniederschläge und ihr Einfluss auf Hochwasserereignisse. 1981.
- Zhulidov, A. V., Headley, J. V., Robarts, R. D., Nikanorov, A. M., Ischenko, A. A. 1997. Atlas of Russian Wetlands. National Hydrology Research Institute. 1997.
- Zimov, S. A., Schuur, E. A. G., Chapin, F. S. 2006. Permafrost and the carbon budget. *Science* 312, pp. 1612-1613. 2006.

## **Eidesstattliche Versicherung**

Hiermit bestätige ich, Sascha Niemann, dass die vorliegende Master Thesis von mir selbstständig und ohne unerlaubte Hilfe Dritter angefertigt wurde. Inhalte und Passagen, die aus fremden Quellen stammen und direkt oder indirekt übernommen worden sind, wurden als solche kenntlich gemacht. Ferner versichere ich, dass ich keine andere, außer der im Literaturverzeichnis angegebenen, Literatur verwendet habe. Diese Versicherung bezieht sich dabei sowohl auf Textinhalte sowie alle enthaltenden Abbildungen und Tabellen.

Weiterhin versichere ich mit meiner Unterschrift, dass diese Arbeit in gleicher oder ähnlicher Form keiner weiteren Prüfungsbehörde vorgelegen hat.

Berlin, 27.11.2014

Sascha Niemann