

Wassertemperaturen und Klimawandel

Schriftenreihe, Heft 39/2011



Vorstudie zur Recherche, Homogenisierung und Plausibilisierung von verfügbaren Daten zu Langzeit-Temperaturreihen von Oberflächen-, Boden-, Sicker- und Grundwasser in Sachsen

Ralph Löser, Dr. Petra Schneider, Nicole Gottschalk,
Heiko Ihling, Karin Kuhn, Dr. Bernd Spänhoff

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Veranlassung und Zielstellung | 8 |
| 1.1 | Einleitung | 8 |
| 2 | Recherchierte Daten und Aufbau der Datenbank | 10 |
| 2.1 | Genereller Aufbau | 10 |
| 2.2 | Abschnitte Stammdaten und Bewegungsdaten | 11 |
| 2.3 | Abschnitt Statistik und Clisax-Wetterdaten | 16 |
| 2.4 | Datentypen | 17 |
| 2.5 | Hinweise zur weiteren Bearbeitung der Datenbank | 17 |
| 3 | Erhobene Daten | 18 |
| 3.1 | Wassertemperaturen Fließgewässer | 19 |
| 3.1.1 | Fließgewässerpegel mit täglicher Messung der Temperatur des LfULG | 19 |
| 3.1.2 | Daten der Stichtagsmessungen des LfULG in Fließgewässerpegeln | 21 |
| 3.1.3 | Messdaten der Gütepegel der Parthe der Landesdirektion Leipzig | 22 |
| 3.1.4 | Oberflächenwassermessstellen der WISMUT GmbH | 24 |
| 3.2 | Wassertemperaturen Standgewässer | 26 |
| 3.2.1 | Daten der LTV zu ausgewählten Speicherbecken und Talsperren | 26 |
| 3.2.2 | Daten Kulkwitzer See der LD Leipzig | 27 |
| 3.3 | Wassertemperaturen Grundwasser | 28 |
| 3.3.1 | Daten des sächsischen Messnetzes Grundwassermessstellen des LfULG | 28 |
| 3.3.2 | Loggerdaten des LfULG | 28 |
| 3.3.3 | Daten der Wettin- und Eisenquelle Bad Brambach | 29 |
| 3.3.4 | Daten der Grundwassermessstellen der LD Chemnitz | 30 |
| 3.3.5 | Daten des Umweltmonitorings der WISMUT GmbH | 30 |
| 3.4 | Wassertemperaturen Bodenwasser | 31 |
| 3.4.1 | Daten des agrarmeteorologischen Messnetzes des LfULG | 31 |
| 3.4.2 | Daten der Lysimeterstation Brandis der BfUL | 32 |
| 3.4.3 | Daten der Bodenhydrologischen Station Forstbestand Naunhof der BfUL | 33 |
| 3.4.4 | Daten der Level-II-DBF des Staatsbetriebes Sachsenforst | 34 |
| 3.4.5 | Daten der Sächsischen Akademie der Wissenschaften Bad Brambach | 34 |
| 3.4.6 | Daten der bodenhydrologischen Messflächen der WISMUT GmbH | 35 |
| 3.5 | Klimadaten | 37 |
| 3.6 | Regionalisierung der Klimadaten | 41 |
| 3.6.1 | Ausweisung von Klimaregionen | 42 |
| 3.6.2 | Interpolation der Klimadaten | 46 |
| 3.6.3 | Aufnahme der Klimadaten in die Datenbank | 47 |
| 3.7 | Datenpaket KliWEP Parthe | 50 |
| 3.8 | Wehrdatenbank | 52 |
| 3.9 | Datenbank Einleiter | 53 |
| 3.10 | Kraftwerke | 54 |
| 3.11 | Vorschlag eines Untersuchungs-/Modellgebietes | 57 |
| 4 | Homogenisierung und Plausibilisierung der Daten | 63 |
| 4.1 | Methodik | 63 |
| 4.2 | Ergebnisse | 65 |
| 4.2.1 | Lufttemperatur | 67 |
| 4.2.2 | Fließgewässerpegel mit täglicher Messung der Temperatur des LfULG | 67 |
| 4.2.3 | Standgewässertemperaturen: Speicherbecken Witznitz | 68 |
| 4.2.4 | Messnetz Grundwassermessstellen des LfULG (Stichtagsmessungen) | 68 |
| 4.2.5 | Loggerdaten Grundwassertemperatur des LfULG | 71 |
| 4.2.6 | Daten der bodenhydrologischen Messflächen | 72 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 4.2.7 | Zusammenfassung | 73 |
| 5 | Modelle | 74 |
| 5.1 | Statistische Ansätze und numerische Modelle | 74 |
| 5.2 | Statistische Ansätze | 74 |
| 5.2.1 | Doppelsummenanalyse | 74 |
| 5.2.2 | Auswertung der angepassten Winkelfunktionen des Jahresganges | 75 |
| 5.2.3 | Nichtlineares Regressionsmodell nach MOHSENI & STEFAN (1999) | 76 |
| 5.3 | Numerische kompartimentbezogene Modelle | 76 |
| 5.3.1 | Allgemeine Modellansätze | 76 |
| 5.3.2 | Bodenwassermodelle | 80 |
| 5.3.3 | Grundwassermodelle | 84 |
| 5.3.4 | Fließgewässermodelle | 87 |
| 5.3.5 | Standgewässermodelle | 97 |
| 5.4 | Kombination kompartimentbezogener Modelle | 99 |
| 5.5 | Integrierte Modellansätze auf Einzugsgebietsebene | 99 |
| 5.6 | Zusammenfassung | 107 |
| 6 | Zusammenfassung und Schlussfolgerungen für weitere Studien | 109 |
| 7 | Literatur | 110 |

| | | |
|---------------|--|----|
| Abbildung 1: | Lage der Fließgewässerpegel mit Tagesreihen der Wassertemperatur des LfULG | 21 |
| Abbildung 2: | Fließgewässerpegel mit Daten des LfULG aus Stichtagsmessungen | 22 |
| Abbildung 3: | Gütepegel in der Parthe mit Temperaturdaten der LD Leipzig | 23 |
| Abbildung 4: | Lage der Oberflächenwassermessstellen der WISMUT GmbH mit Daten der Wassertemperatur | 25 |
| Abbildung 5: | Lage der Standgewässermessstellen der WISMUT GmbH | 25 |
| Abbildung 6: | Lage der Talsperren und Speicherbecken, deren Daten im Rahmen der Studie beschafft wurden | 27 |
| Abbildung 7: | Lage der Grundwassermessstellen mit Temperaturdaten des LfULG | 28 |
| Abbildung 8: | Pegel mit Datenloggern und Tagesreihen der Grundwassertemperatur aus WINSTYX | 29 |
| Abbildung 9: | Lage der Messstellen mit Daten der LD Chemnitz | 30 |
| Abbildung 10: | Stationen des agrarmeteorologischen Messnetzes des LfULG | 32 |
| Abbildung 11: | Lage der Lysimeterstation Brandis und der Station Naunhof | 33 |
| Abbildung 12: | Level-II-Dauerbeobachtungsflächen des Staatsbetriebes Sachsenforst | 34 |
| Abbildung 13: | Lage der Messstelle Bad Brambach | 35 |
| Abbildung 14: | Standorte der bodenhydrologischen Messflächen der WISMUT GmbH | 36 |
| Abbildung 15: | Meteorologische Stationen mit Beobachtungs- und Projektionsdaten | 39 |
| Abbildung 16: | Lage der Wetterstationen mit Daten aus dem Projekt KliWEP | 40 |
| Abbildung 17: | Gliederung der Fläche des Freistaates Sachsen in Naturräume | 43 |
| Abbildung 18: | Gliederung der Fläche des Freistaates Sachsen in Höhenzonen | 45 |
| Abbildung 19: | Einteilung der Landesfläche in Klimaregionen für die Zuweisung meteorologischer Datenreihen | 45 |
| Abbildung 20: | Einteilung des Einzugsgebietes der Parthe in Teilgebiete | 46 |
| Abbildung 21: | Exemplarische Darstellung der interpolierten Lufttemperatur als Jahresmittel für die Klimaregionen | 47 |
| Abbildung 22: | Wichtungsfaktoren zur Berechnung der Temperatursumme des zurückliegenden Zeitraums | 48 |
| Abbildung 23: | Darstellung der gleitenden Mittelwerte der Lufttemperatur mit reziprokem Wichtungsfaktor | 49 |
| Abbildung 24: | Darstellung der gleitenden Mittelwerte der Lufttemperatur mit linearem Wichtungsfaktor | 49 |
| Abbildung 25: | Lage der Stauanlagen in Sachsen (Datenquelle: Wehrdatenbank) | 52 |
| Abbildung 26: | Industrielle Einleiter | 53 |
| Abbildung 27: | Einleitstellen kommunaler Kläranlagen | 54 |
| Abbildung 28: | Recherchierte Lage ehemaliger und bestehender Kraftwerke | 57 |
| Abbildung 29: | Fließgewässerpegel mit täglichen Temperaturmessungen (links) und Stichtagsmessungen (rechts) | 58 |
| Abbildung 30: | Gewässergütepegel | 58 |
| Abbildung 31: | Grundwassermessstellen mit Stichtagsmessungen (links) und Datenloggern (rechts) | 59 |
| Abbildung 32: | Agrarmeteorologische Stationen des LfULG | 59 |
| Abbildung 33: | Lysimeterstation Brandis und Station Naunhof (links), Klimastationen aus KliWEP (rechts) | 60 |
| Abbildung 34: | Lage der Level-II-Station Colditz des SBS | 60 |
| Abbildung 35: | DWD-Stationen mit Messreihen des LfULG und WEREX-IV-Projektionsdaten | 61 |
| Abbildung 36: | Agrarmeteorologische Stationen des DWD | 61 |
| Abbildung 37: | Wehre und Stauanlagen aus der Wehrdatenbank (links) und kommunale Kläranlagen (rechts) | 62 |
| Abbildung 38: | Beispiel einer angepassten Sinusfunktion an gemessene Temperaturdaten (Fließgewässer) | 64 |
| Abbildung 39: | Angepasste Sinusfunktion an Grundwassertemperaturen (oben) und Darstellung der Residuen (unten) | 64 |
| Abbildung 40: | Fließgewässer-Temperaturreihe mit einem als Ausreißer identifizierten Messwert | 66 |
| Abbildung 41: | Langfristiger Trend der mittleren Jahrestemperaturen in Fließgewässern | 67 |
| Abbildung 42: | Mittlere Jahressgänge der Wassertemperatur, Speicher Witznitz | 68 |
| Abbildung 43: | Veränderung der Grundwassertemperatur als Folge der Umstellung des Messsystems (1998) | 70 |
| Abbildung 44: | Exemplarische Darstellung einer zeitlichen Veränderung der Grundwassertemperatur | 70 |
| Abbildung 45: | Exemplarische Darstellung der Messdaten über einen langen Zeitraum | 71 |
| Abbildung 46: | Exemplarische Darstellung einer typischen Temperaturentwicklung in den letzten beiden Jahren | 72 |
| Abbildung 47: | Mittlere Jahressgänge der Bodenwassertemperatur in unterschiedlichen Tiefen | 73 |
| Abbildung 48: | Zusammenhang zwischen den mittleren Jahressgängen der Lufttemperatur (rot) und dem mittleren Jahressgang der Wassertemperatur (blau) anhand der Parameter der angepassten Winkelfunktionen | 75 |

| | | |
|---------------|--|-----|
| Abbildung 49: | Modellschema CoupModel | 82 |
| Abbildung 50: | Berechnung der Veränderung der Grundwassertemperatur aufgrund der Einleitung warmer Wässer aus geothermischer Nutzung in die Vorflut mit SPRING® (Quelle: www.delta-h.de) | 85 |
| Abbildung 51: | Berechnung der Veränderung der Grundwassertemperatur aufgrund der Einleitung warmer Wässer aus geothermischer Nutzung in die Vorflut mit SPRING® (Schnittdarstellung, Quelle: www.delta-h.de)..... | 85 |
| Abbildung 52: | Räumliche Diskretisierung eines Fließgewässerabschnittes in Segmente (COLE & WELLS 2008)..... | 93 |
| Abbildung 53: | Diskretisierung eines Gewässernetzes in Form verknüpfter Elemente (nodes) in SNTMP | 95 |
| Abbildung 54: | In SNTMP berücksichtigte Teilprozesse des Wärmehaushaltes von Fließgewässern (BARTHOLOW 2000) | 96 |
| Abbildung 55: | ArcEGMO – Überblick über die simulierten Teilprozesse des PSCN-Moduls (KLÖCKING & SUCKOW 2003) | 101 |
| Abbildung 56: | Modellschema LARSIM | 102 |
| Abbildung 57: | Modellschema von LARSIM-WT | 104 |
| Abbildung 58: | In LARSIM-WT berücksichtigte Wärmeaustauschprozesse, aus HAAG et al. (2005) | 105 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|-------------|---|----|
| Tabelle 1: | Abschnitte Stamm- und Bewegungsdaten des Bereichs Fließgewässer (FG)..... | 12 |
| Tabelle 2: | Abschnitte Stamm- und Bewegungsdaten des Bereichs Standgewässer (SG) | 13 |
| Tabelle 3: | Abschnitte Stamm- und Bewegungsdaten des Bereichs Grundwasser (GW)..... | 14 |
| Tabelle 4: | Abschnitte Stamm- und Bewegungsdaten des Bereichs Bodenwasser (BW)..... | 15 |
| Tabelle 5: | Aufbau des Abschnitts Statistik..... | 16 |
| Tabelle 6: | Aufbau des Abschnitts Clisax-Wetterdaten | 16 |
| Tabelle 7: | Stand der Aufnahme der recherchierten Daten in die Projektdatenbank | 18 |
| Tabelle 8: | Fließgewässerpegel mit gemessenen Tagesreihen der Wassertemperatur | 19 |
| Tabelle 9: | Gütepegel der Parthe mit Daten der LD Leipzig | 23 |
| Tabelle 10: | Standgewässer der LTV (SB = Speicherbecken, TS = Talsperre)..... | 26 |
| Tabelle 11: | Meteorologische Stationen mit Datenübergabe Messdaten und WEREX-IV-Projektion | 38 |
| Tabelle 12: | Gliederung der Fläche des Freistaates Sachsen in Naturräume..... | 43 |
| Tabelle 13: | Einteilung des Einzugsgebietes der Parthe in Teilgebiete | 46 |
| Tabelle 14: | Zeiträume für die Berechnung der Temperatursummen | 48 |
| Tabelle 15: | Auszug aus dem Datenpaket KliWEP Parthe | 50 |
| Tabelle 16: | Existierende Wärmekraftwerke mit mind. 100 MW Leistung | 54 |
| Tabelle 17: | Biomassekraftwerke..... | 55 |
| Tabelle 18: | Ehemalige Kraftwerke in Sachsen und angrenzenden Gebieten | 56 |
| Tabelle 19: | Auf Plausibilität geprüfte und in die Projektdatenbank aufgenommene Datenanzahlen | 65 |
| Tabelle 20: | Messstellen mit typischen Verläufen der Grundwassertemperatur und Abweichungen von solchen..... | 69 |

1 Veranlassung und Zielstellung

Die Wassertemperatur ist einer der wichtigsten Parameter, der die chemischen Gleichgewichte und die Entwicklung der Fauna und Flora in unseren Gewässern beeinflusst. Eine Temperaturerhöhung vermindert die Löslichkeit von Sauerstoff, beschleunigt Stoffwechsel- und Entwicklungsprozesse wie z. B. die Photosynthese bei Wasserpflanzen oder die Entwicklung der Fische und erhöht die Empfindlichkeit der Organismen gegenüber giftigen Substanzen, Parasiten und Krankheiten. In der Folge führt dies unter anderem zu geänderten Stoffkreisläufen und Angeboten an Nahrungsquellen, Sauerstoffmangelsituationen und Verschiebungen in der Artenzusammensetzung.

Die Wassertemperatur wird durch wasserwirtschaftliche Maßnahmen und die Landnutzung im Einzugsgebiet der Gewässer beeinflusst. Zu diesen Einflussfaktoren zählen unter anderem Kühlwasser- und Abwassereinleitungen, Durchflussverminderung durch Nutzung von Oberflächen- und Grundwasser, Wasseranstau im Einzugsgebiet, landwirtschaftliche Nutzung (Sickerwasser- menge, Bewässerung), forstliche Bewirtschaftungsmaßnahmen, Beseitigung von Ufer-/Vorlandbewuchs, Kanalentwässerung und Einleitung von Regenwasserabfluss versiegelter Flächen. Hinzu kommt die Erhöhung der Lufttemperatur infolge der globalen Erwärmung, die sich regional bereits stärker auswirkt als die erstgenannten Faktoren.

Aufgrund der großen wasserwirtschaftlichen und ökologischen Bedeutung der Wassertemperatur wurde die vorliegende Studie mit folgenden Inhalten durchgeführt:

- Klärung der kurzfristig verfügbaren Datenlage zu möglichst lückenlosen Langzeit-Temperaturreihen für Oberflächengewässer, Sicker-, Boden- und oberflächennahem Grundwasser
- Analyse der statistischen Zusammenhänge zwischen Lufttemperatur und den Wassertemperaturen der genannten Kompartimente
- Überprüfung der Möglichkeiten, die erhobenen Daten für die Kalibrierung eines Modells zur Abschätzung der Auswirkungen des Klimawandels auf die Wassertemperaturen in Sachsen zu nutzen. Überprüfung der Eignung des Einzugsgebietes der Parthe als Modellgebiet für weiterführende Studien zu den Auswirkungen des Klimawandels auf die Temperaturen der Wasserhaushaltskomponenten

Die Sammlung der Daten war nur aufgrund der Kooperationsbereitschaft vieler Ansprechpartner möglich. Ihnen wird an dieser Stelle gedankt: Dr. Henning Andreae (Staatsbetrieb Sachsenforst); Karin Freier, Maik Ulrich, Ronny Friedrich (Landestalsperrenverwaltung); Hans-Joachim Berger, Uwe Könnig (Landesdirektion Chemnitz); Dr. Ulrich Koch, Herr Ludwig (Sächsische Staatsbäder GmbH); Dr. Michael Paul (WISMUT GmbH); Dr. Ingrid Carmienke (Landesdirektion Leipzig), Dr. Christian Schmidt (Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle).

1.1 Einleitung

Die aktuellen Simulationen mit dem Klimamodell WEREX zeigen für Sachsen einen Anstieg der mittleren Lufttemperatur in den nächsten 50 Jahren um etwa zwei Grad an (SMUL 2005). Zwischen Lufttemperatur und der Temperatur von Oberflächenwasser besteht ein enger Zusammenhang, weil sowohl die Temperatur der Luft als auch die des Wassers im Wesentlichen von denselben Energieströmen bestimmt wird. Einfache lineare Korrelationen zwischen Luft- und Wassertemperaturen bilden aber nicht die komplexen Vorgänge des Wärmehaushaltes von Gewässern ab (JOHNSON 2002). Betrachtet man verfügbare Langzeitdatenreihen bezüglich des statistischen Zusammenhangs zwischen Luft- und Fließgewässertemperaturen, stellt sich eher ein sigmoidaler Verlauf als signifikant dar, weil Extremwerte der Lufttemperatur ($< 0\text{ °C}$ und $> 20\text{-}25\text{ °C}$ je nach Klimaregion) im Wasser gepuffert werden, so sinkt die Wassertemperatur kaum unter 0 °C (ERICKSON et al. 1998, MORRILL et al. 2005). Dennoch wird der Klimawandel einen nicht unerheblichen Einfluss auf die zukünftige Entwicklung der Oberflächengewässertemperaturen ausüben. Historische Trends zeigen schon heute eine Erwärmung von Fließgewässern und Seen an, die zwar auch durch direkte anthropogene Beeinflussung (z. B. Kühl- und Abwassereinleitungen, Ufergehölz-beseitigung, Urbanisierung), im Wesentlichen aber durch den Anstieg der Lufttemperatur in den letzten Jahrzehnten bedingt sind (HAAG 2009, KAUSHAL et al.

2010). Allerdings ist es schwierig, sonstige anthropogene Aktivitäten, die sich ebenfalls auf die Gewässer auswirken und zu einer Erhöhung der Wassertemperatur führen können (POOLE & BERMAN 2001) deutlich von möglichen Effekten der Lufttemperaturerhöhung als mögliche Folge des Klimawandels zu trennen.

Die Wassertemperatur ist ein entscheidender Faktor für physikalische, chemische und biologische Prozesse wie z. B. Sauerstofflöslichkeit, Photosyntheseraten, Algenproduktion und mikrobielle Abbauraten organischer Verbindungen in Gewässern. In Oberflächengewässern spielt die Temperatur darüber hinaus auch eine wichtige Rolle bei der Verbreitung von höheren Lebewesen wie z. B. Fischen oder benthische Invertebraten (CAISSIE 2006). Die mögliche Änderung des Temperaturregimes in Oberflächengewässern aufgrund des Klimawandels kann somit weitreichende Folgen für die aquatischen Biozöosen hinsichtlich der Habitatverteilung (EATON & SCHELLER 1996), Diversität (BURGMER et al. 2007), Artverbreitung (HERING et al. 2009) sowie die Zusammensetzung von Artengemeinschaften (DURANCE & ORMEROD 2007) und die Funktion von Gewässerökosystemen (MEYER et al. 1999, MORRILL et al. 2005) haben. Für die Analyse der Auswirkungen von veränderten Lufttemperaturen auf Wassertemperaturen werden Langzeitdatenreihen notwendig, die einen repräsentativen Zeitraum abbilden, weil ansonsten kurzzeitige Wetterschwankungen Langzeittrends überlagern können. ERICKSON et al. (1999) haben in ihrer Studie dargelegt, dass Temperaturdaten über mindestens 12 Jahre vorliegen müssen, um repräsentative Aussagen zwischen Luft- und Fließgewässertemperaturen mittels eines nicht linearen Regressionsmodells treffen zu können.

Boden-, Sicker- und Grundwassertemperaturen könnten zukünftig ebenfalls durch den Anstieg der Temperaturen in Folge des möglichen Klimawandels betroffen sein. Dies hätte Auswirkungen sowohl auf bodenbiologische als auch biochemische Prozesse in den Wasserhaushaltskompartimenten. Die Temperatur des Grundwassers in tiefen Grundwasserschichten ist von der Lufttemperatur im Wesentlichen unabhängig. Die Wassertemperaturen von oberflächennahem Grundwasser und Quellen (ausgenommen spezielle Quelltypen wie Thermalquellen) entsprechen in etwa dem Jahresmittel der Lufttemperatur, sodass gerade in den empfindlichen Quelllebensräumen, auf die sich bestimmte Tier- und Pflanzenarten aufgrund der besonderen Habitatbedingungen der konstanten Temperaturverhältnisse spezialisiert haben, der Einfluss eines Temperaturanstieges dramatische Folgen für diese oftmals seltenen Arten haben kann (GERECKE & FRANZ 2006). Viele Quellarten sind sogenannte kaltstenotherme Arten, die geringere Wassertemperaturen bevorzugen und darauf ihren Lebenszyklus angepasst haben. Steigen die Temperaturen über das Toleranzmaß der jeweiligen Arten an, ist damit zu rechnen, dass die Art aus der Quellregion verschwindet. Dies kann erheblich zum fortschreitenden Verlust der biologischen Artenvielfalt beitragen.

Weitere Auswirkungen vor allem von steigenden Boden- und Sickerwassertemperaturen können Veränderungen der Humusbildung, des generellen Stoffumsatzes in den Bodenschichten und Veränderungen der Lebensgemeinschaften im Boden und Grundwasser sein. Dies wiederum kann sich auch auf die jeweilige Landnutzungsform nachhaltig auswirken. Die möglichen Auswirkungen einer klimawandelbedingten Temperaturerhöhung auf bestimmte Stoffwechselprozesse wie z. B. den Kohlenstoffabbau im Boden werden in wissenschaftlichen Kreisen aber kontrovers diskutiert (DAVIDSON & JANSSENS 2006). Des Weiteren machen vorliegende Modellierungsergebnisse für Hessen (BERTHOLD & HERGESELL 2005) sowie das Fachkonzept zur Berechnung des Wasserhaushaltes für Sachsen (TU DRESDEN 2005) deutlich, dass die prognostizierte Klimaänderung wesentlichen Einfluss auf die Grundwasserneubildung ausüben wird.

Vorrangiges Ziel der Studie war daher, die digital vorliegenden und kurzzeitig verfügbaren Daten zu Oberflächen-, Boden-, Sicker- und Grundwassertemperaturen in Sachsen zu sammeln, zu vereinheitlichen und zu plausibilisieren. Diese Daten werden u. a. genutzt, um die Möglichkeiten einer Modellierung der zukünftigen Wassertemperaturentwicklung unter Berücksichtigung des projizierten Klimawandels zu prüfen. Dafür wurden die zurzeit gängigsten Wassertemperaturmodelle auf ihre Anwendbarkeit geprüft.

2 Recherchierte Daten und Aufbau der Datenbank

In der Vorstudie wurde eine Recherche von Temperaturen im Oberflächenwasser (Standgewässer, Fließgewässer, Quellen), Boden- und Sickerwasser und im oberflächennahen Grundwasser durchgeführt. Diese Recherche betraf in erster Linie das Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG) und die Staatliche Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft (BfUL), aber auch weitere Behörden, Institutionen und Betreiber von wasserwirtschaftlichen Anlagen.

Die umfangreichsten Datensätze, die kurzfristig verfügbar waren, stammen vom LfULG. Dabei handelt es sich um Stichtagsmessungen in 1.186 Grundwassermessstellen und Quellen sowie Loggerdaten von 92 Messstellen. Die Grundwassermessstellen sind zum Teil in bis zu vier Tiefenbereichen verfiltert, sodass Grundwassertemperaturen für mehrere Grundwasserleiter vorhanden sind. Die Daten wurden zur weiteren Bearbeitung mit der Filtertiefe ergänzt. Für die Fließgewässer waren die Temperaturdaten des sächsischen Basismessnetzes der 29 Fließgewässerpegel mit täglicher Temperaturmessung und Temperaturdaten von Stichtagsmessungen in 1.251 Fließgewässermessstellen im Zeitraum 1999 bis 2009 verfügbar. Die Datenreihen der Fließgewässerpegel sind unterschiedlich lang und gehen zum Teil bis zum Jahr 1955 zurück (Pegel Magwitz).

Weitere Daten entstammen der WISMUT-Umweltdatenbank zur Beschaffenheit von Oberflächen- und Grundwassermessstellen, der Lysimeterstation Brandis (Bodentemperaturen und Wetterdaten im Einzugsgebiet der Parthe), meteorologischen Stationen des Staatsbetriebes Sachsenforst, der Landestalsperrenverwaltung für ausgewählte Talsperren und Speicher, der Landesdirektion Leipzig und der Sächsischen Akademie der Wissenschaften Bad Brambach bzw. der Staatsbadverwaltung (langjährigen Temperaturreihen der Wettin- und Eisenquelle sowie Bodentemperaturen). Zusätzlich recherchiert wurden meteorologische Messdaten von 21 Standorten und die Daten der WEREX-IV-Klimaprojektion für diese Standorte sowie gemessene Bodentemperaturen und Klimadaten von 14 Stationen des agrarmeteorologischen Messnetzes. Einige angefragte Einrichtungen konnten ausschließen, dass gemessene Wassertemperaturen vorliegen (z. B. Naturparkverwaltungen, Anglerverband Sachsen).

Im ersten Schritt erfolgte die Datensammlung zunächst in einem gängigen Tabellenformat (MS-Excel), sodass die Daten leicht bearbeitet, ausgewertet oder in andere Formate überführt werden konnten. Danach wurden die im Rahmen der Recherche gesammelten Daten in eine Access-Datenbank überführt.

2.1 Genereller Aufbau

Beim Aufbau der Datenbank zeigte sich, dass sich die Kompartimente Fließgewässer, Standgewässer, Grundwasser und Bodenwasser hinsichtlich der nutzbringenden Informationen unterscheiden. So ist für Fließgewässer im Gegensatz zu den anderen Kompartimenten die Mess-/Entnahmetiefe nicht vorrangig. Dafür stellen Durchfluss oder Wasserstand wichtige Informationen dar, ebenso der Gewässername und die Einzugsgebietsfläche. Beim Grundwasser ist die Filterstrecke und der verfilterte Grundwasserleiter, ebenso Grundwasserstand und Förderrate von besonderem Interesse. Wichtige Parameter für Standgewässer sind deren Größe, Volumen, Wasserstand, weiterhin die limnologische Schicht, in der gemessen wurde, und spezielle Informationen wie Eisbedeckung, Sichttiefe und Sauerstoffgehalt.

An Stationen, an denen Bodentemperaturen gemessen werden, werden meist auch meteorologische Größen ermittelt, die in die Datenbank integriert wurden.

Aus den genannten Gründen wurde die Datenbank nach den Kompartimenten in vier Bereiche gegliedert: Fließgewässer (FG), Standgewässer (SG), Grundwasser (GW) und Bodenwasser (BW). Allen Bereichen ist die folgende Einteilung der Informationen in vier Abschnitte gemeinsam:

- Abschnitt Stammdaten: enthält Informationen zur Messstelle wie Name und Nummer, Koordinaten, Messstellenart, Gewässername, Ausbau usw.
- Abschnitt Bewegungsdaten: enthält Datum und Uhrzeit der Messung, Wassertemperatur, Wasserstand, Durchfluss, Sauerstoffgehalt, gemessene Wetterdaten
- Abschnitt Statistik: enthält den Mittelwert aller Messwerte der Messstelle über den Gesamtzeitraum und die Standardabweichung, weiterhin die Parameter der angepassten Winkelfunktion für den mittleren Jahresgang, die Abweichung des Messwertes vom Jahresgang und den Mittelwert aller Abweichungen vom Jahresgang und die Standardabweichung
- Abschnitt Clisax: enthält die Klimaregion, in der sich die Messstelle befindet, und die auf diese Klimaregion interpolierten gemessenen meteorologischen Daten (Clisax) von 21 Wetterstationen wie Temperatur, Temperatursummen berechnet nach unterschiedlichen Verfahren, Luftfeuchte, Sonnenscheindauer, Windgeschwindigkeit und Niederschlag im Zeitraum 1981-2003

Die Stammdaten wurden entsprechend der gesammelten Informationen den Datensätzen zugeordnet. Sie können i. d. R. noch vervollständigt werden wie z. B. bei fehlender Geländehöhe durch die Höhenangabe aus topografischen Karten oder durch später beschaffte Durchflüsse oder Grundwasserstände. Während die Stammdaten sich mit der Zeit nicht ändern, bilden die Bewegungsdaten einen bestimmten Zeitpunkt ab oder repräsentieren das Tagesmittel bzw. die Tagessumme. Der Eintrag für Datum und Uhrzeit der Messung erfolgt dabei nicht getrennt. Ganzzahlige Einträge (ohne Datumsformatierung, Format „Standard“) stellen Tagesmittelwerte dar, weil der Zeiteintrag als Nachkommawert fehlt. Nicht ganzzahlige Einträge belegen, dass es sich um eine Messung zu einer bestimmten Uhrzeit handelt. Der nicht ganzzahlige Anteil entspricht der Uhrzeit (zwischen 0 und 1). Die Uhrzeit wird erkennbar durch entsprechende Formatierung als Datum-Zeit-Format und kann nachträglich durch Berechnung des nicht ganzzahligen Anteils separiert werden. Anhand der statistischen Informationen können für jede Messung ein Erwartungswert anhand der mittleren jahreszeitlichen Temperaturentwicklung der Messstelle und die Abweichung des Messwertes von diesem Erwartungswert bestimmt werden. Weiterhin erlauben die Parameter der angepassten Winkelfunktion des Jahresganges eine weiterführende statistische Auswertung.

Die Clisax-Wetterdaten erlauben die Ermittlung der meteorologischen Bedingungen am Tag der Messung. Dabei handelt es sich stets um Tagesmittelwerte bzw. -summen, auch wenn es sich beim Messwert um einen Momentwert mit angegebener Uhrzeit handelt. Es konnten den Datensätzen nur die interpolierten Wetterdaten des Zeitraums 1981-2003 zugewiesen werden. Der Abschnitt Clisax-Wetterdaten von Datensätzen aus anderen Zeiträumen ist nicht belegt. Nach erfolgter Dateninterpolation der aktuellen Daten des LfULG 1961-2009 (Abschnitt 0) oder der Beschaffung von Rasterklimadaten für die betroffenen Messstellen (RaKliDa, Abschnitt 0) können die betroffenen Datensätze vervollständigt werden.

2.2 Abschnitte Stammdaten und Bewegungsdaten

Die Datenbankfelder der Datenbankbereiche für die vier Kompartimente entsprechen dem Spektrum an verwertbaren Informationen aller gesammelten Datensätze. Je nach Datensatz kann sich die Informationsfülle und damit Belegung der Datenbankfelder jedoch deutlich unterscheiden, so enthalten z. B. viele Grundwasserdatensätze neben den Stammdaten der Messstelle nur das Datum der Messung und die Wassertemperatur, während andere Datensätze weiterhin den Grundwasserstand, die Förderrate, die Mess-/Entnahmetiefe, die Lufttemperatur und die Methode der Temperaturmessung umfassen.

Tabelle 1: Abschnitte Stamm- und Bewegungsdaten des Bereichs Fließgewässer (FG)

| Kürzel | Beschreibung | Abschnitt |
|-----------------------|---|----------------|
| PEGEL | Pegelname, Messort | Stammdaten |
| MKZG | Messstellenkennziffer, Messpunkt Kürzel | Stammdaten |
| GEWAESSER | Gewässername | Stammdaten |
| ART | Messstellenart | Stammdaten |
| RW | Rechtsw. (Bessel-Ellipsoid, Gauss-Krüger-Koord. Zone 4) [m] | Stammdaten |
| HW | Hochwert (Bessel-Ellipsoid, Gauss-Krüger-Koord. Zone 4) [m] | Stammdaten |
| GOK | Geländehöhe [m HN] | Stammdaten |
| KM | Fluss-Kilometer [km] | Stammdaten |
| EZG | Einzugsgebietsfläche [km ²] | Stammdaten |
| FGLANDSCH | Fließgewässerlandschaft | Stammdaten |
| FGTYP | Fließgewässertyp | Stammdaten |
| GEOLOGIE | Geologie im EZG | Stammdaten |
| OWK_ID | Identifikationsnummer Oberflächenwasserkörper | Stammdaten |
| OWK_NAME | Name Oberflächenwasserkörper | Stammdaten |
| OWK_EINZUGSGEBIET_EZG | Identifikationsnummer EZG Oberflächenwasser | Stammdaten |
| OWK_NAME_EZG | Name EZG Oberflächenwasser | Stammdaten |
| HAUPTFL_GEBIET | Hauptfließgewässergebiet | Stammdaten |
| BEMERKG | Bemerkung zu den Stammdaten | Stammdaten |
| DATUM | Datum der Messung [TT.MM.JJJJ hh:mm] | Bewegungsdaten |
| TW | Wassertemperatur [°C] | Bewegungsdaten |
| Q | Durchfluss [m ³ /s] | Bewegungsdaten |
| W | Wasserstand [m] | Bewegungsdaten |
| O2 | O2-Gehalt [mg/l] | Bewegungsdaten |
| TL | Lufttemperatur [°C] | Bewegungsdaten |
| METHODE | Methodik der Temperaturmessung | Bewegungsdaten |
| QUELLE | Datenquelle | Bewegungsdaten |
| BEM | Bemerkung zu den Bewegungsdaten | Bewegungsdaten |

Tabelle 2: Abschnitte Stamm- und Bewegungsdaten des Bereichs Standgewässer (SG)

| Kürzel | Beschreibung | Abschnitt |
|--------------|--|----------------|
| BEZ | Bezeichnung des Standgewässers | Stammdaten |
| CODE | LfULG-Code des Standgewässers | Stammdaten |
| TYP | Art des Standgewässers | Stammdaten |
| MENA | Messstellenname | Stammdaten |
| MKZG | Messstellenkennziffer, Messpunktkürzel | Stammdaten |
| TK25 | Topografische Karte 1:25000 | Stammdaten |
| RW | Rechtswert (Bessel-Ellipsoid, Gauss-Krüger-Koordinaten Zone 4) [m] | Stammdaten |
| HW | Hochwert (Bessel-Ellipsoid, Gauss-Krüger-Koordinaten Zone 4) [m] | Stammdaten |
| GOK | Geländehöhe [m HN] | Stammdaten |
| GEWAESSER | Gestautes Gewässer | Stammdaten |
| AZ | Oberfläche bei Stauziel [m ²] | Stammdaten |
| VZ | Volumen bei Stauziel [m ³] | Stammdaten |
| TIEFE_MITTEL | Mittlere Tiefe bei Stauziel [m] | Stammdaten |
| TIEFE_MAX | Maximale Tiefe bei Stauziel [m] | Stammdaten |
| BEMERKG | Bemerkung zu den Stammdaten | Stammdaten |
| DATUM | Datum der Messung [TT.MM.JJJJ hh:mm] | Bewegungsdaten |
| TIEFE | Messtiefe unter Wasseroberfläche [m] | Bewegungsdaten |
| HORIZONT | Horizont der Messung | Bewegungsdaten |
| SCHICHT | Limnologische Schicht | Bewegungsdaten |
| TW | Wassertemperatur [°C] | Bewegungsdaten |
| O2 | O2-Gehalt [mg/l] | Bewegungsdaten |
| H | Wasserstand (Beckenpegel) [m HN] | Bewegungsdaten |
| V | Volumen [m ³] | Bewegungsdaten |
| QZ | Zufluss [m ³ /s] | Bewegungsdaten |
| QA | Abfluss [m ³ /s] | Bewegungsdaten |
| EISFL | Eisbedeckung [% der Oberfläche] | Bewegungsdaten |
| EISD | Eisdicke [m] | Bewegungsdaten |
| SICHT | Sichttiefe [m] | Bewegungsdaten |
| QUELLE | Datenquelle | Bewegungsdaten |
| BEM | Bemerkung zu den Bewegungsdaten | Bewegungsdaten |

Tabelle 3: Abschnitte Stamm- und Bewegungsdaten des Bereichs Grundwasser (GW)

| Kürzel | Beschreibung | Abschnitt |
|-----------|--|----------------|
| MKZG | Messstellenkennziffer, Messpunkt Kürzel | Stammdaten |
| BENA | Name der Bohrung | Stammdaten |
| MENA | Messstellenname | Stammdaten |
| ORT | Standort der Messstelle, Objekt | Stammdaten |
| ART | Messstellenart | Stammdaten |
| TK25 | Topografische Karte 1:25000 | Stammdaten |
| RW | Rechtswert (Bessel-Ellipsoid, Gauss-Krüger-Koordinaten Zone 4) [m] | Stammdaten |
| HW | Hochwert (Bessel-Ellipsoid, Gauss-Krüger-Koordinaten Zone 4) [m] | Stammdaten |
| GOK | Geländehöhe [m HN] | Stammdaten |
| ROK | Höhe Rohroberkante [m HN] | Stammdaten |
| FILTERANZ | Anzahl Filter | Stammdaten |
| FILTERNR | Nr. des beprobten Filterraumes (1: oberer Filter, 2: mittlerer Filter ...) | Stammdaten |
| FILTERO | Filteroberkante [m HN] | Stammdaten |
| FILTERU | Filterunterkante [m HN] | Stammdaten |
| AUSBSOHL | Ausbausohle [m HN] | Stammdaten |
| ENDTEUFE | Endteufe [m HN] | Stammdaten |
| GWL | Verfilterter Grundwasserleiter (oberflächennah/ 2. GWL / 3. GWL, ggf. stratigrafische Zuordnung); Bsp. WISMUT-UDB: Oberflächennaher Kluftgrundwasserleiter Gkl-GW | Stammdaten |
| GWK | Grundwasserkörper | Stammdaten |
| BEMERKG | Bemerkung zu den Stammdaten | Stammdaten |
| DATUM | Datum der Messung [TT.MM.JJJJ hh:mm] | Bewegungsdaten |
| TW | Wassertemperatur [°C] | Bewegungsdaten |
| STAND | Wasserstand vor Messung, Ruhewasserspiegel [m HN] | Bewegungsdaten |
| QF | Förderrate, Quellschüttung [l/s] | Bewegungsdaten |
| TIEFE | Entnahmetiefe bzw. Messtiefe, GW-Anschnitt [m HN] | Bewegungsdaten |
| TL | Lufttemperatur [°C] | Bewegungsdaten |
| METHODE | Methodik der Temperaturmessung | Bewegungsdaten |
| QUELLE | Datenquelle | Bewegungsdaten |
| BEM | Bemerkung zu den Bewegungsdaten | Bewegungsdaten |

Tabelle 4: Abschnitte Stamm- und Bewegungsdaten des Bereichs Bodenwasser (BW)

| Kürzel | Beschreibung | Abschnitt |
|-----------|--|----------------|
| STATION | Messflächenname | Stammdaten |
| ORT | Standort der Messfläche, Objekt | Stammdaten |
| BETREIBER | Betreiber der Messfläche | Stammdaten |
| TF | Teilfläche | Stammdaten |
| RW | Rechtswert (Bessel-Ellipsoid, Gauss-Krüger-Koordinaten Zone 4) [m] | Stammdaten |
| HW | Hochwert (Bessel-Ellipsoid, Gauss-Krüger-Koordinaten Zone 4) [m] | Stammdaten |
| GOK | Geländehöhe [m HN] | Stammdaten |
| SONDE | Sonden-Nr. | Stammdaten |
| BEMERKG | Bemerkung zu den Stammdaten | Stammdaten |
| DATUM | Datum der Messung [TT.MM.JJJJ hh:mm] | Bewegungsdaten |
| T | Bodentemperatur [°C] | Bewegungsdaten |
| TEUFE | Messtiefe [cm] | Bewegungsdaten |
| BOFRO | Frosteindringtiefe [cm] | Bewegungsdaten |
| METHODE | Methodik der Temperaturmessung | Bewegungsdaten |
| GRH200 | an der Station gemessene Globalstrahlung 2 m Messhöhe [J/cm ² /d] | Bewegungsdaten |
| SSD | an der Station gemessene Sonnenscheindauer [h/d] | Bewegungsdaten |
| PRECIP100 | an der Station gemessene Niederschlagssumme 1 m Messhöhe (Hellmann-Regenmesser) [mm/d] | Bewegungsdaten |
| P_OMBRO | an der Station gemessene Niederschlagssumme 1 m Messhöhe (Ombrometer) [mm/d] | Bewegungsdaten |
| SCHNEEH | an der Station gemessene Schneehöhe [cm] | Bewegungsdaten |
| HUMAIR050 | an der Station gemessene relative Luftfeuchte 0.5 m Messhöhe [%] | Bewegungsdaten |
| HUMAIR200 | an der Station gemessene relative Luftfeuchte 2 m Messhöhe [%] | Bewegungsdaten |
| TAIR020 | an der Station gemessene Lufttemperatur 0.2 m Messhöhe [°C] | Bewegungsdaten |
| TAIR050 | an der Station gemessene Lufttemperatur 0.5 m Messhöhe [°C] | Bewegungsdaten |
| TAIR200 | an der Station gemessene Lufttemperatur 2 m Messhöhe [°C] | Bewegungsdaten |
| WSPE250 | an der Station gemessene Windgeschwindigkeit 2.5 m Messhöhe [m/s] | Bewegungsdaten |
| WSPE10 | an der Station gemessene Windgeschwindigkeit 10 m Messhöhe [m/s] | Bewegungsdaten |
| PETW | Potenzielle Verdunstung nach WENDLING [mm/d] | Bewegungsdaten |
| QUELLE | Datenquelle | Bewegungsdaten |
| BEM | Bemerkung zu den Bewegungsdaten | Bewegungsdaten |

2.3 Abschnitt Statistik und Clisax-Wetterdaten

Die Abschnitte Statistik und Clisax-Wetterdaten haben bei allen vier Bereichen den gleichen Aufbau. Sie schließen sich an die Abschnitte Stammdaten und Bewegungsdaten an.

Die Koeffizienten der Winkelfunktion des Jahresganges sind in Kapitel 4 erläutert. Das Feld RES enthält mit der Differenz des Messwertes der Wassertemperatur vom Funktionswert der Winkelfunktion die Abweichung vom mittleren Erwartungswert.

Tabelle 5: Aufbau des Abschnitts Statistik

| Kürzel | Beschreibung | Abschnitt |
|------------|--|-----------|
| A | Koeffizient a der Winkelfunktion des Jahresganges | Statistik |
| B | Koeffizient b der Winkelfunktion des Jahresganges | Statistik |
| C | Koeffizient c der Winkelfunktion des Jahresganges | Statistik |
| D | Koeffizient d der Winkelfunktion des Jahresganges | Statistik |
| RES | Differenz des Messwertes vom mittleren Jahresgang (Residuen) | Statistik |
| ANZ | Anzahl Messwerte nach Entfernung Ausreißer | Statistik |
| MITTEL | Mittelwert Messwerte | Statistik |
| STABW | Standardabweichung Messwerte | Statistik |
| MITTEL_RES | Mittelwert Residuen | Statistik |
| STABW_RES | Standardabweichung Residuen | Statistik |

Die Berechnung der Temperatursummen bzw. gleitenden Mittelwerte ist in Kapitel 3.6.3 beschrieben.

Tabelle 6: Aufbau des Abschnitts Clisax-Wetterdaten

| Kürzel | Beschreibung | Abschnitt |
|----------|--|-----------|
| KLIMAREG | Klimaregion | Clisax |
| TA | Clisax-Tagesmittelwert Lufttemperatur in 2 m Messhöhe [°C] | Clisax |
| TS007 | Clisax-Temperatursumme (gleit. Mittel) der letzten 7 d, reziproker Wichtungsfaktor | Clisax |
| TS015 | Clisax-Temperatursumme (gleit. Mittel) der letzten 15 d, reziproker Wichtungsfaktor | Clisax |
| TS030 | Clisax-Temperatursumme (gleit. Mittel) der letzten 30 d, reziproker Wichtungsfaktor | Clisax |
| TS060 | Clisax-Temperatursumme (gleit. Mittel) der letzten 60 d, reziproker Wichtungsfaktor | Clisax |
| TS090 | Clisax-Temperatursumme (gleit. Mittel) der letzten 90 d, reziproker Wichtungsfaktor | Clisax |
| TS180 | Clisax-Temperatursumme (gleit. Mittel) der letzten 180 d, reziproker Wichtungsfaktor | Clisax |
| TS365 | Clisax-Temperatursumme (gleit. Mittel) der letzten 365 d, reziproker Wichtungsfaktor | Clisax |
| TL007 | Clisax-Temperatursumme (gleit. Mittel) der letzten 7 d, linearer Wichtungsfaktor | Clisax |

| Kürzel | Beschreibung | Abschnitt |
|---------|--|-----------|
| TL015 | Clisax-Temperatursumme (gleit. Mittel) der letzten 15 d, linearer Wichtungsfaktor | Clisax |
| TL030 | Clisax-Temperatursumme (gleit. Mittel) der letzten 30 d, linearer Wichtungsfaktor | Clisax |
| TL060 | Clisax-Temperatursumme (gleit. Mittel) der letzten 60 d, linearer Wichtungsfaktor | Clisax |
| TL090 | Clisax-Temperatursumme (gleit. Mittel) der letzten 90 d, linearer Wichtungsfaktor | Clisax |
| TL180 | Clisax-Temperatursumme (gleit. Mittel) der letzten 180 d, linearer Wichtungsfaktor | Clisax |
| TL365 | Clisax-Temperatursumme (gleit. Mittel) der letzten 365 d, linearer Wichtungsfaktor | Clisax |
| RF | Clisax-Tagesmittelwert Luftfeuchte in 2 m Messhöhe [%] | Clisax |
| P | Clisax-Tagessumme Niederschlag in 1 m Messhöhe (ohne Korrektur) [mm/d] | Clisax |
| S | Clisax-Tagessumme Sonnenscheindauer [h/d] | Clisax |
| RG | Clisax-Tagessumme Globalstrahlung [J/cm ²] | Clisax |
| V2 | Clisax-Windgeschwindigkeit in 2 m Messhöhe [m/s] | Clisax |
| V10 | Clisax-Windgeschwindigkeit in 10 m Messhöhe [m/s] | Clisax |
| BEM_MET | Bemerkungen zur Meteorologie, z. B. Datenquelle | Clisax |

2.4 Datentypen

Alle Datumswerte, alle Messwerte, die statistischen Parameter und die interpolierten Klimadaten liegen in der Datenbank als reelle Zahl vor. Ist der Datumswert ganzzahlig, handelt es sich bei den Messwerten um Tagesmittelwerte. Qualitative Merkmale wie die limnologische Schichtzuordnung liegen in Form von Texteinträgen vor. Dies gilt auch für die Stammdaten oder Einträge für die Datenquelle oder zusätzliche Informationen (Bemerkung).

2.5 Hinweise zur weiteren Bearbeitung der Datenbank

Weil es vorkommen kann, dass Daten bestimmter Messstellen von mehreren Betreibern geliefert wurden wie z. B. Messdaten der Parthe sowohl von der Landesdirektion Leipzig als auch vom LfULG, besteht die Möglichkeit, dass einige Messdaten in der Datenbank mehrfach vorkommen. Deshalb sollte vor der weiteren Arbeit mit der Datenbank geprüft werden, inwieweit Dopplungen vorkommen. Hierzu sollte als Kriterium Messstelle, Datum und Uhrzeit der Messung und der Messwert der Wassertemperatur herangezogen werden. Sind diese Daten identisch, liegt eine Dopplung vor.

3 Erhobene Daten

Die recherchierten Messdaten sind sowohl in Form der unveränderten Rohdateien dokumentiert als auch in Form der aufgebauten Datenbanken.

Tabelle 7: Stand der Aufnahme der recherchierten Daten in die Projektdatenbank

| | Wassertemperatur aufgenommen? | Gemessene Wetterdaten zugeordnet? | Stammdaten zugeordnet? | Jahresgänge berechnet? | Jahresgänge zugeordnet? | Mittel und Standardabweichung berechnet? | Klimaregion zugeordnet? | Klimadaten zugeordnet? |
|---|-------------------------------|-----------------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|--|-------------------------|------------------------|
| Fließgewässer | | | | | | | | |
| Fließgewässerpegel mit täglicher Messung der Wassertemperatur des LfULG | x | x ¹⁾ | x | x | x | x | x | x |
| Daten der Stichtagsmessungen des LfULG in Fließgewässerpegeln | x | x ¹⁾ | x | x | x | x | x | x |
| Messdaten der Gütepegel der Parthe der LD Leipzig | x | x ¹⁾ | x | x | x | x | x | x |
| Oberflächenwassermessstellen der WISMUT GmbH | x | x ¹⁾ | x | x | x | x | x | x |
| Standgewässer | | | | | | | | |
| Daten der Landestalsperrenverwaltung: Speicher Witznitz | x | x | x | x | x | x | x | x |
| Daten der Landestalsperrenverwaltung: andere | x | x | x | - ²⁾ | - ²⁾ | - ²⁾ | x | x |
| Daten Kulkwitzer See der LD Leipzig | x | x ¹⁾ | x | - ²⁾ | - ²⁾ | - ²⁾ | x | x |
| Oberflächenwassermessstellen der WISMUT GmbH | x | x ¹⁾ | x | x | x | x | x | x |
| Grundwasser | | | | | | | | |
| Daten des sächsischen Messnetzes Grundwassermessstellen des LfULG | x | x ¹⁾ | x | x | x | x | x | x |
| Loggerdaten des LfULG | x | x ¹⁾ | x | x | x | x | x | x ³⁾ |
| Daten der Wettin- und Eisenquelle Bad Brambach | x | x | x | x | x | x | x | x |
| Daten der Grundwassermessstellen der LD Chemnitz | x | x ¹⁾ | x | x | x | x | x | x |
| Daten des Umweltmonitorings der WISMUT GmbH | x | x ¹⁾ | x | x | x | x | x | x |
| Bodenwasser | | | | | | | | |
| Daten des agrarmeteorologischen Messnetzes des LfULG | x | x | x | x | x | x | x | x |
| Daten der Lysimeterstation Brandis der BfUL | x | x | x | x | x | x | x | x |

| | | | | | | | | |
|--|---|-----------------|---|---|---|---|---|-----------------|
| Daten der Bodenhydrologischen Station Forstbestand Naunhof der BfUL | x | x ¹⁾ | x | x | x | x | x | x ³⁾ |
| Daten der Level-II-Dauerbeobachtungsflächen des Staatsbetriebes Sachsenforst | x | x | x | x | x | x | x | x |
| Daten der Sächsischen Akademie der Wissenschaft Bad Brambach | x | x | x | x | x | x | x | x |
| Daten der bodenhydrologischen Messflächen der WISMUT GmbH | x | x ¹⁾ | x | x | x | x | x | x |

¹⁾ keine gemessenen Wetterdaten vorhanden

²⁾ statistische Auswertung exemplarisch nur für Speicher Witznitz durchgeführt aufgrund der Gewässerbewirtschaftung und anderer anthropogener Beeinflussung (z. B. Überleitungen)

³⁾ Klimadaten 1981-2003 liegen nicht im Messzeitraum

Die Rohdaten sind nicht im Bericht enthalten, weil sie vielfach Daten oder Informationen enthalten, die nicht in die Datenbank integriert wurden. Dies betrifft sowohl Informationen, die in der Datenbankstruktur nicht vorgesehen sind als auch Daten, welche im Rahmen der Vorstudie nicht aufgearbeitet wurden (anthropogen beeinflusste Standgewässer). Der Arbeitsstand des Aufbaus der Datenbank ist in Tabelle 7 dargestellt.

3.1 Wassertemperaturen Fließgewässer

3.1.1 Fließgewässerpegel mit täglicher Messung der Temperatur des LfULG

Vom LfULG wurden Tagesreihen der Wassertemperatur der folgenden 29 Pegel in sächsischen Fließgewässern ausgewertet:

Tabelle 8: Fließgewässerpegel mit gemessenen Tagesreihen der Wassertemperatur

| Pegelname | Pegel-Nr. | Gewässer | Zeitraum mit T-Daten | Funktion |
|-----------------------|-----------|------------------|----------------------|--------------------|
| Bad Dübén 1 | 560051 | Vereinigte Mulde | 11/1985-10/2007 | W, Q, TW, HWW, DGJ |
| Bautzen UP | 582031 | k. A. | 11/1976-10/1989 | W, Q, HWW |
| Bautzen Weite Bleiche | 582030 | Spree | 11/1962-10/1999 | W, Q, HWW, DGJ |
| Böhlen 1 | 577571 | Pleiße | 11/2000-10/2007 | W, Q, TW, HWW, DGJ |
| Boxberg | 583200 | Schwarzer Schöps | 11/1980-10/1999 | W, Q, HWW, DGJ |
| Dresden | 501060 | Elbe | 11/1947-10/1994 | W, Q, TW, HWW, DGJ |
| Erlin | 566100 | Freiberger Mulde | 11/1986-10/2007 | W, Q, TW, HWW, DGJ |
| Görlitz | 660160 | Lausitzer Neiße | 11/1985-10/2007 | W, Q, TW, HWW, DGJ |
| Golzern 1 | 560021 | Vereinigte Mulde | 11/1978-10/2007 | W, Q, TW, HWW, DGJ |
| Gröditz | 583120 | Löbauer Wasser | 11/1971-10/1999 | W, Q, HWW, DGJ |
| Hartau | 660010 | Lausitzer Neiße | 11/1978-10/1980 | W, Q, DGJ |
| Jänkendorf | 583250 | Schwarzer Schöps | 11/1980-10/1999 | W, Q, HWW, DGJ |
| Kleindalzig | 576631 | Weißer Elster | 05/1994-10/2007 | W, Q, TW, HWW, DGJ |
| Leipzig-Großzschocher | 576740 | k. A. | 11/1990-12/1999 | k. A. |
| Leipzig-Thekla | 578110 | Parthe | 11/1990-10/2007 | W, Q, TW, HWW, DGJ |

| Pegelname | Pegel-Nr. | Gewässer | Zeitraum mit T-Daten | Funktion |
|-----------------|-----------|-----------------|----------------------|--------------------|
| Lichtenwalde | 567450 | Zschopau | 11/1965-10/1991 | W, Q, DGJ |
| Lieske | 582060 | Spree | 11/1975-10/1989 | W, Q, HWW, DGJ |
| Magwitz | 576420 | Weißer Elster | 11/1956-10/1979 | W, Q, HWW |
| Mylau | 577220 | Göltzsch | 11/1960-10/1991 | W, Q, HWW, DGJ |
| Oberthau | 576900 | k. A. | 11/1987-10/1990 | k. A. |
| Regis-Serbitz | 577540 | Pleiße | 11/1985-07/2007 | W, Q, TW, DGJ |
| Rosenthal | 660120 | Lausitzer Neiße | 11/1978-10/2007 | W, Q, TW |
| Särichen | 583290 | Weißer Schöps | 11/1980-11/1999 | W, Q, TW, HWW, DGJ |
| Schirgiswalde | 582010 | Spree | 11/1975-10/1999 | W, Q, HWW, DGJ |
| Schöna | 501010 | Elbe | 11/1980-10/1990 | W, Q, TW, HWW, DGJ |
| Strehla | 501120 | Elbe | 11/1961-02/1999 | k. A. |
| Zeitz | 576610 | Weißer Elster | 11/1986-10/1991 | k. A. |
| Zittau 1 | 660100 | Lausitzer Neiße | 11/1978-10/2007 | W, Q, TW, HWW, DGJ |
| Zwickau-Pölbitz | 562070 | Zwickauer Mulde | 11/1975-10/2007 | W, Q, TW, HWW, DGJ |

W Wasserstandsmessstelle
 Q Durchflussmessstelle
 TW Wassertemperaturmessstelle
 HWW Hochwassermeldepegel
 DGJ Daten des Pegels im Deutschen Gewässerkundlichen Jahrbuch veröffentlicht

Es handelt sich um Messdaten der Wassertemperatur von jeweils täglich um 07:00 Uhr vor der Einführung der automatischen Datenerfassung am 1. November 2007. Die Messungen wurden im Gewässer, nicht im Pegelschacht durchgeführt (tel. Mitt. BfUL FB 34, Messnetzbetrieb OW/GW Leipzig, betrifft Golzern 1, Bad Düben 1, Erlin, Kleindalzig, Böhlen 1). Es wurden 211.942 Messdaten auf Plausibilität geprüft und in die Datenbank überführt. In die Datenbank aufgenommen wurden die Stammdaten und Messdaten, bereinigt um Ausreißer (sechs Werte) und auf Plausibilität geprüft, ergänzt um Mittelwert, Streuung, Parameter des Jahresganges, Residuen, Mittelwert und Streuung der Residuen und Clisax-Wetterdaten 1981-2003.

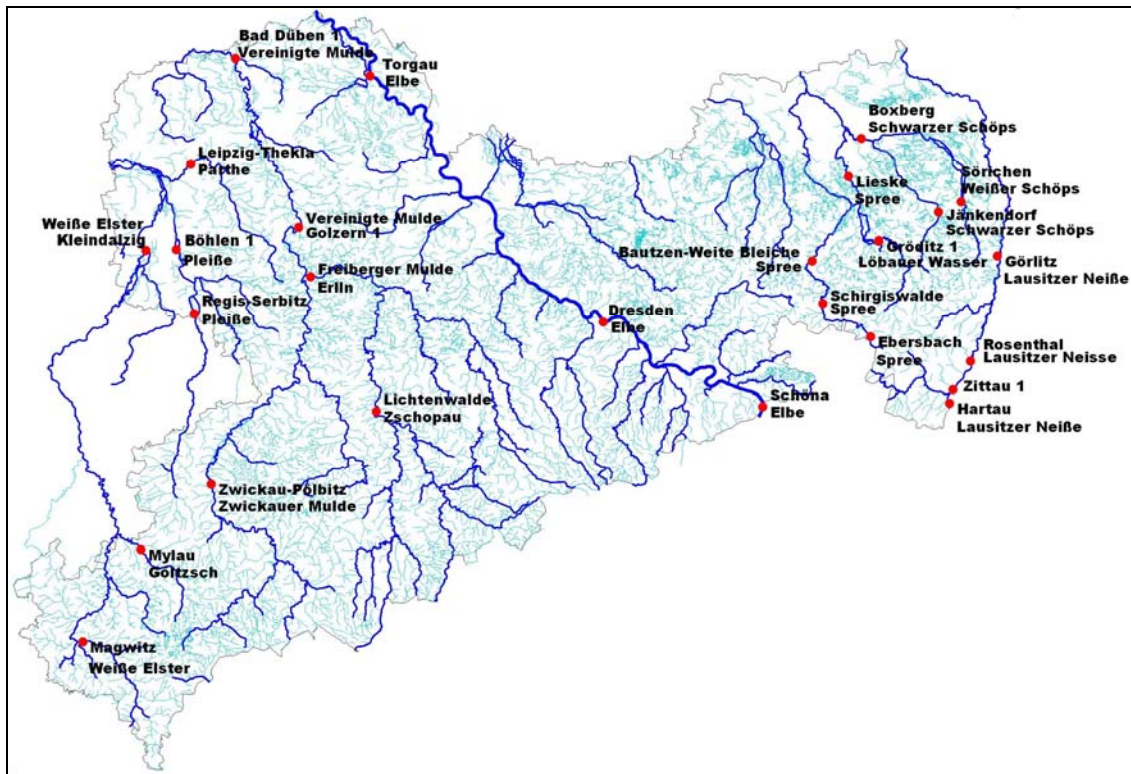


Abbildung 1: Lage der Fließgewässerpegel mit Tagesreihen der Wassertemperatur des LfULG

3.1.2 Daten der Stichtagsmessungen des LfULG in Fließgewässerpegeln

Seit 1999 werden an insgesamt 1.251 Fließgewässermessstellen Stichtagsmessungen u. a. des Vorortparameters Wassertemperatur durchgeführt. Die insgesamt 58.405 Messungen wurden in die Fließgewässerdatenbank überführt, Ausreißer wurden entfernt. In die Datenbank aufgenommen wurden die Stammdaten und Messdaten, bereinigt um Ausreißer (48 Werte) und auf Plausibilität geprüft, ergänzt um Mittelwert, Streuung, Parameter des Jahresganges, Residuen, Mittelwert und Streuung der Residuen und Clisax-Wetterdaten 1981-2003.

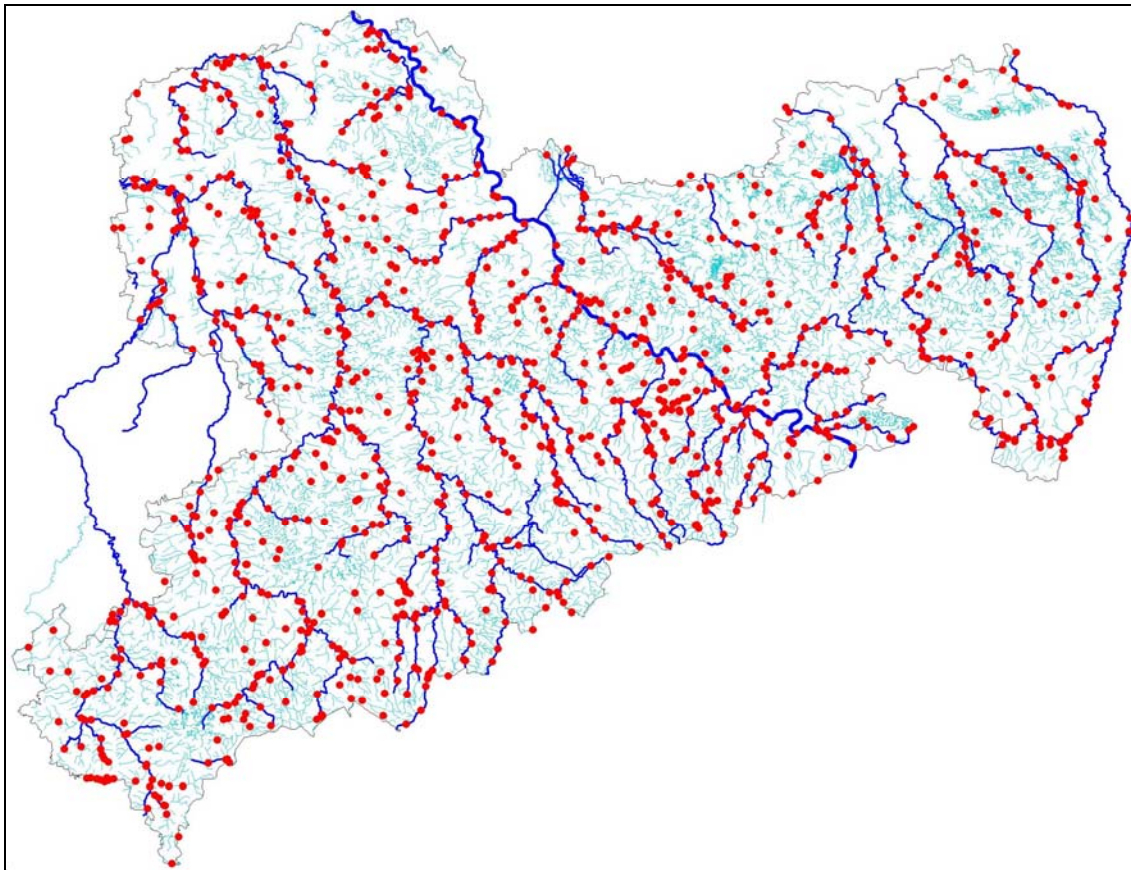


Abbildung 2: Fließgewässerpegel mit Daten des LfULG aus Stichtagsmessungen

3.1.3 Messdaten der Gütepegel der Parthe der Landesdirektion Leipzig

In der Parthe befinden sich neun Gewässergütepegel, die regelmäßig beprobt wurden und deren Daten von der LD Leipzig bis 1990 bereitgestellt wurden (Tabelle 9). Bei den Messwerten handelt es sich um Stichtagsmessungen der Wassertemperatur als Vorortparameter. Die Datenreihen gehen zum Teil bis ins Jahr 1944 zurück (F5520), seit 1954 werden fünf Pegel beprobt, seit 1973 sieben Pegel und seit 1984 neun Pegel.

In die Datenbank aufgenommen wurden die Stammdaten und Messdaten, bereinigt um Ausreißer (fünf Werte) und auf Plausibilität geprüft, ergänzt um Mittelwert, Streuung, Parameter des Jahresganges, Residuen, Mittelwert und Streuung der Residuen und Clisax-Wetterdaten 1981-2003.

Bei der Sichtung der Daten durch die Landesdirektion Leipzig wurde festgestellt, dass die Gewässeruntersuchungen erst mit einer beginnenden, zeitweise extremen Abwasserbelastung des Gewässers einsetzen und daher nicht den natürlichen Charakter der Parthe beschreiben. Dies zeigen auch die Einträge in den gesammelten Datensätzen zu Sichttiefe, Aussehen, Färbung und Geruch. Damit sind die Daten bzw. auch das Bearbeitungsgebiet Parthe zumindest nur unter Vorbehalt und nach genauere Prüfung für Untersuchungen zur langjährigen Temperaturentwicklung geeignet.

Tabelle 9: Gütepegel der Parthe mit Daten der LD Leipzig

| Messstelle | Nr. | MTB | Fluss- km | HW | RW | ehem. Fkm | ehem. HW | ehem. RW | FE in km ² |
|------------------|-------|------|--------------|---------|---------|-----------|----------|----------|--------------------------|
| Großbardau | F5480 | 4742 | 48,5 | 5674670 | 4548750 | | | | 30 |
| Grèthen | F5490 | 4741 | 43,3 | 5678010 | 4546170 | | | | 46 |
| Lindhardt | F5495 | 4741 | 37,3 | 5680260 | 4541160 | | | | 47 |
| Erdmannshain | F5500 | 4741 | 33,1 | 5683950 | 4540415 | | | | 76 |
| | F5510 | | | | | | | | |
| Plöszitz | F5520 | 4641 | 18,5 | 5693720 | 4536000 | | | | 260 |
| Plaußig | F5525 | 4640 | 11,9 | 5695245 | 4531850 | | | | 310 |
| Thekla | F5530 | 4640 | 7,4 | 5692860 | 4528900 | 9,95 | 5694160 | 4530355 | 315 |
| Zoo | F5539 | 4640 | 2,95 | 5690450 | 4525970 | | | | 396 |
| Vollbedingstraße | F5540 | 4640 | 0,7 | 5691380 | 4524440 | 1,45 | 5691450 | 4525075 | 401 |

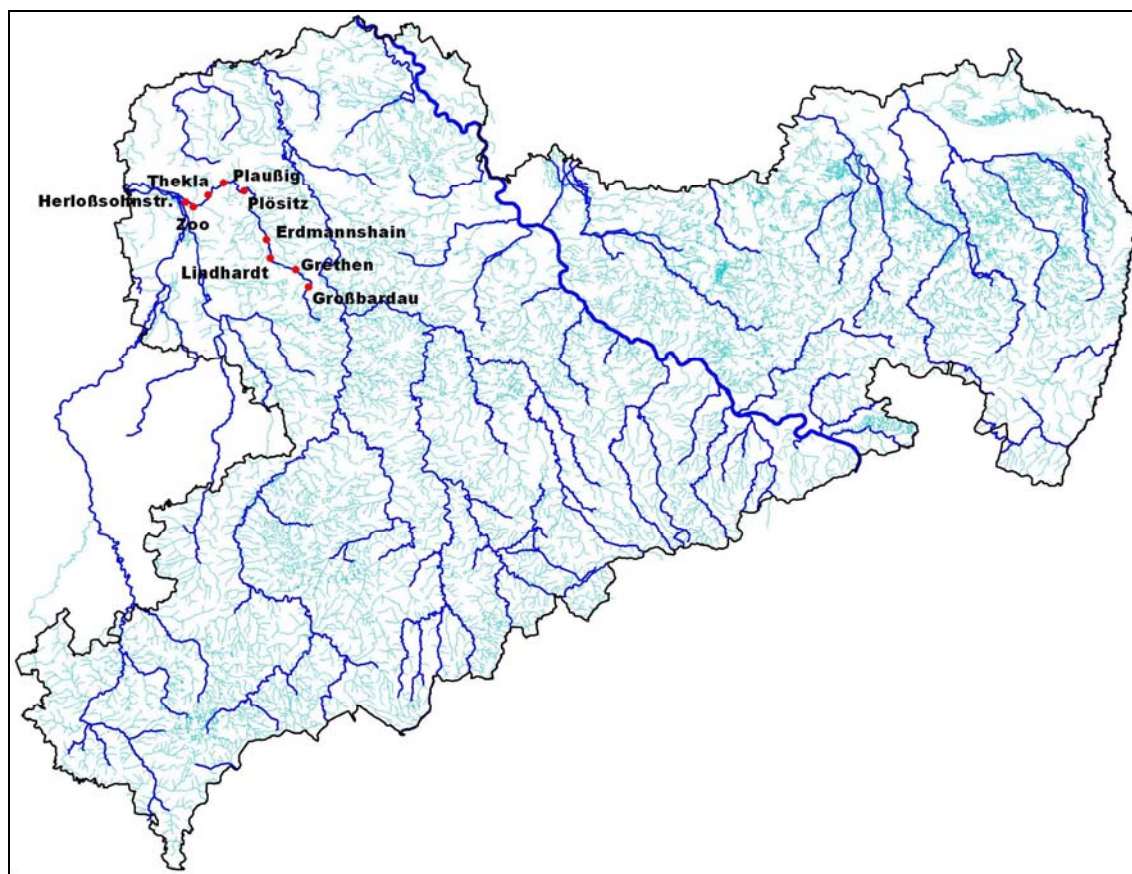


Abbildung 3: Gütepegel in der Parthe mit Temperaturdaten der LD Leipzig

3.1.4 Oberflächenwassermessstellen der WISMUT GmbH

Aus der WISMUT-Umweltdatenbank wurden insgesamt 6.894 Datensätze der als Vorortparameter gemessenen Wassertemperatur von 33 Messstellen gesammelt. Einige dieser Messstellen sind Haldensickerwassermessstellen oder beeinflusst durch Grubenwassereinleitung, Wasseraufbereitung oder andere Nutzung. Zwei Messstellen betreffen Standgewässer.

Es verbleiben folgende 26 unbeeinflusste Fließgewässermessstellen mit 5.195 Datensätzen (Abbildung 4):

Kaitzbach oberhalb Bergehalde Dresden-Gittersee
Rotliegendquelle
Quelle Eselsbach
Eselsbach nach Einmündung des Teufelsbaches
Elbufer Rathen
Schlema, Silberbach, vor Mündung in den Schlemabach
Borbach am ehem. Trennbauwerk auf Höhe Ersatzbiotop
Einzugsgebiet Kohlunzbach, Halde 371/I, N-Rand, im Wald (m-066)
Einzugsgebiet Kohlunzbach, Halde 371/I, N-Rand, im Wald (m-067)
Kohlunzbach, nördlicher Anstrombereich Halde 371/I
Borbach, Quellgebiet, nördlich Halde 382W
Zwickauer Mulde südl. Hartenstein, am ehem. Kinderheim
Pöhla, Luchsbach im Anstrom der Luchsbachhalde
Aue, Zwickauer Mulde, abstromseitig der Schillerbrücke
Schlema, Schlemabach, Unterlauf, an der Hauptstraße
Alberoda, Alberodabach, vor Mündung in Zwickauer Mulde
Halde 309, nördl. Anstrombereich, Quellgebiet im Wald
Schlema, Schlemabach, Mittellauf, vor Schacht 15IIb
Alberoda, Alberodabach, Oberlauf, an der Edelmannmühle
Einzugsgebiet Wiesenbach, südl. H371/II, Drainageablauf
Zwickauer Mulde Wehr Mühlgraben (vor Betrieb)
Oberrothenbacher Bach v. Einmündung in Mulde(OR/1)
Zwickauer Mulde Muldenbrücke Schlunzig (nach Betrieb)
Lauterbach n. Zufluss d. Dänkritzer Baches
Zinnborn gesamt Höhe Pegel 780
Unterlauf Zinnbach, Höhe Lauenhainer Grund

Zusätzlich wurden auch Messdaten von zwei Standgewässern (Bad Schlema, Silberbachtal, Ablauf Silberbachteich und Teich Forellenmühle) zur Verfügung gestellt (Abbildung 5). Für erstere Messstelle sind lediglich zwei Messwerte vorhanden, für den Teich Forellenmühle 60 Messungen im Zeitraum 1994-2009.

In die Datenbank aufgenommen wurden Stammdaten und Messdaten, bereinigt um Ausreißer und auf Plausibilität geprüft, ergänzt um Mittelwert, Streuung, Parameter des Jahresganges, Residuen, Mittelwert und Streuung der Residuen und Clisax-Wetterdaten 1981-2003.

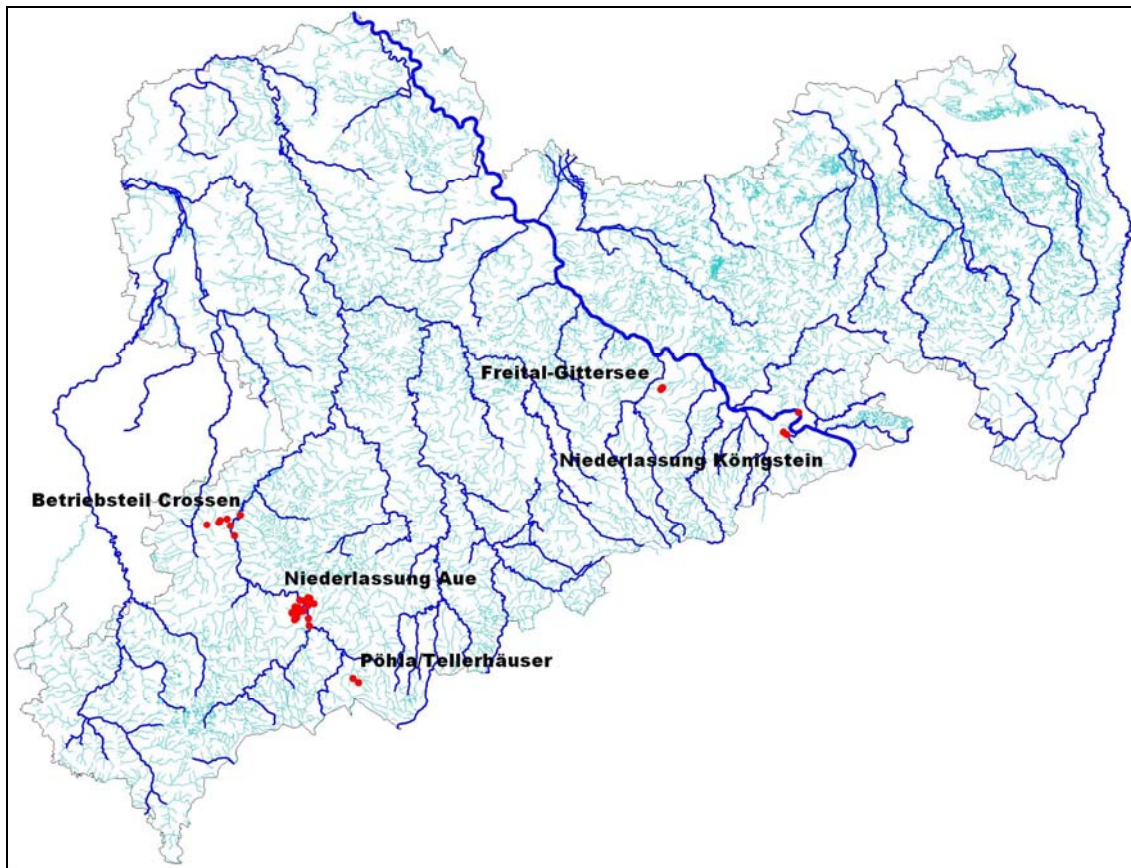


Abbildung 4: Lage der Oberflächenwassermessstellen der WISMUT GmbH mit Daten der Wassertemperatur

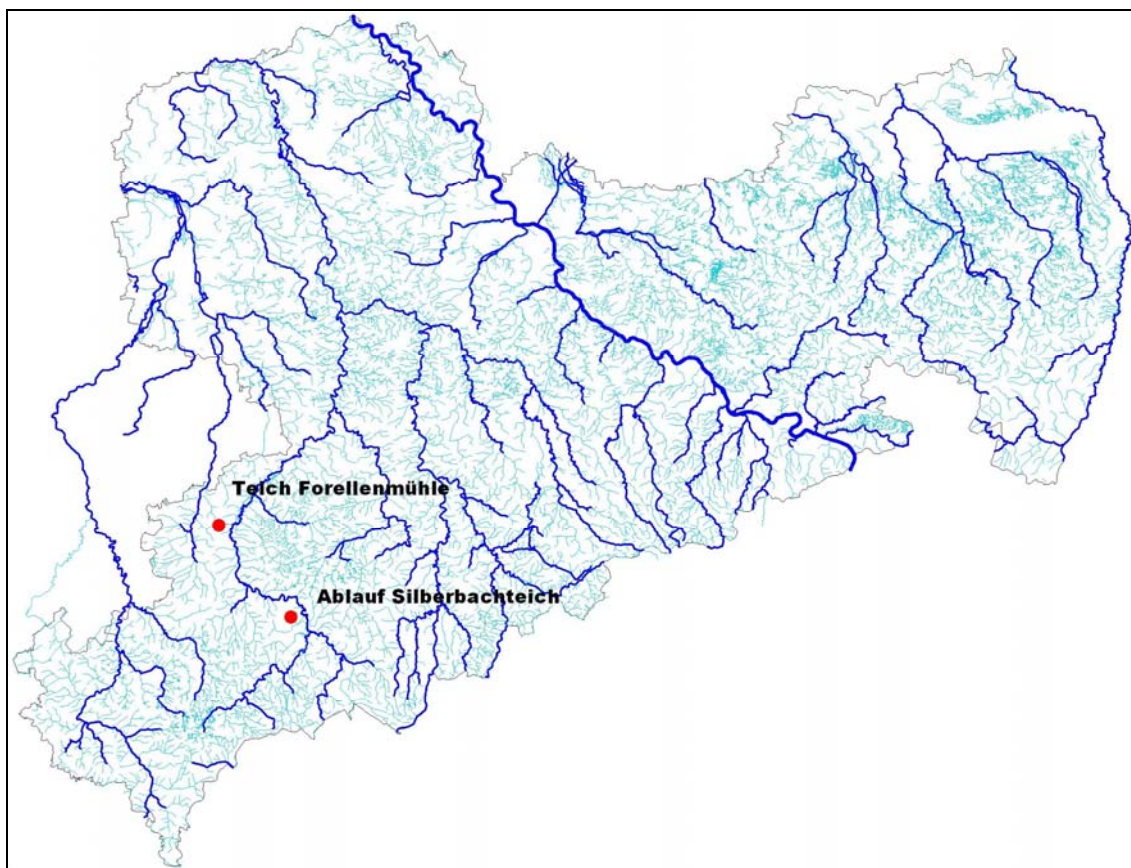


Abbildung 5: Lage der Standgewässermessstellen der WISMUT GmbH

3.2 Wassertemperaturen Standgewässer

3.2.1 Daten der LTV zu ausgewählten Speicherbecken und Talsperren

Von der LTV wurden Messdaten der Wassertemperatur von fünf Speicherbecken und Talsperren in Nordwestsachsen bereitgestellt (Tabelle 10). Weitere umfangreiche Messdaten liegen für alle von der LTV bewirtschafteten Talsperren und Speicherbecken vor. Aufgrund des großen Aufwandes bei der Datenbeschaffung wurde diese auf den Raum Nordwestsachsen konzentriert, in dem auch das Einzugsgebiet der Parthe liegt. Die übergebenen Daten umfassen mit einer Ausnahme auch die Stauhöhe-Stauinhalt- und die Stauhöhe-Staufläche-Kennlinien, weiterhin teilweise auch Angaben zur limnologischen Schichtung, Wasserführung (Zu-/Abfluss, Wasserstand, Stauvolumen), Sichttiefe und Eisbedeckung. Die Wassertemperaturen der Speicherbecken werden an Messpunkten im Gewässer erhoben, die der Talsperren an den Staudämmen.

Tabelle 10: Standgewässer der LTV (SB = Speicherbecken, TS = Talsperre)

| Anlage | Charakteristik | Gestautes Gewässer | Datensätze |
|---------------------|---|--------------------|--|
| Großer Teich Torgau | Ehemaliger Fischteich, jetzt Stauteich, ohne Stauinhaltskennlinien. Flaches Gewässer. Stauraum 2.7 Mio. m ³ , mittlere Tiefe 1.5 m (Angaben geschätzt) | Schwarzer Graben | 48 Datensätze |
| SB Borna | Künstliches Speicherbecken. Von Ringdamm umgeben, im Süden (Zufluss) unmittelbar vom HRB Regis-Serbitz begrenzt. Stauinhalts- und Stauflächenkennlinien liegen vor. Stauraum 100 Mio. m ³ , mittlere Tiefe 19.1 m ³ . | Pleiße | 3.407 Datensätze der Wassertemperatur in unterschiedlicher Tiefe |
| SB Witznitz | Künstliches Speicherbecken. Stauinhalts- und Stauflächenkennlinien liegen vor. Stauraum 24.7 Mio. m ³ , mittlere Tiefe 9.7 m | Eula | 2.426 Datensätze der Wassertemperatur in unterschiedlicher Tiefe |
| TS Schömbach | Ursprünglich als „grünes“ Hochwasserrückhaltebecken geplant, nun Talsperre mit Dauerstau um 1 Mio. m ³ . Flaches Gewässer, mittlere Tiefe 2.2 m. Stauinhalts- und Stauflächenkennlinien liegen vor. | Wyhra | 544 Datensätze der Wassertemperatur in unterschiedlicher Tiefe |
| TS Windischleuba | Talsperre, mittlere Höhe bei Stauziel 0.9 m | Pleiße | 354 Datensätze der Wassertemperatur in unterschiedlicher Tiefe |

Die Lage der Talsperren und Speicherbecken ist in Abbildung 6 dargestellt.

Bei der Auswertung der Daten ist zu beachten, dass es sich um bewirtschaftete Gewässer handelt und die Bewirtschaftung (Ausflussregulierung, Überleitung) sich auf die limnologische Schichtung auswirkt. In den Speicher Witznitz z. B. wird Wasser aus der Freiburger Mulde über den Steingrundbach und die Eula übergeleitet.

In die Datenbank aufgenommen wurden die Stammdaten und Messdaten, bereinigt um Ausreißer und auf Plausibilität geprüft, exemplarisch ergänzt um Mittelwert, Streuung, Parameter des Jahreganges, Residuen, Mittelwert und Streuung der Residuen (nur Speicher Witznitz, messtiefenbezogen) und Clisax-Wetterdaten 1981-2003.

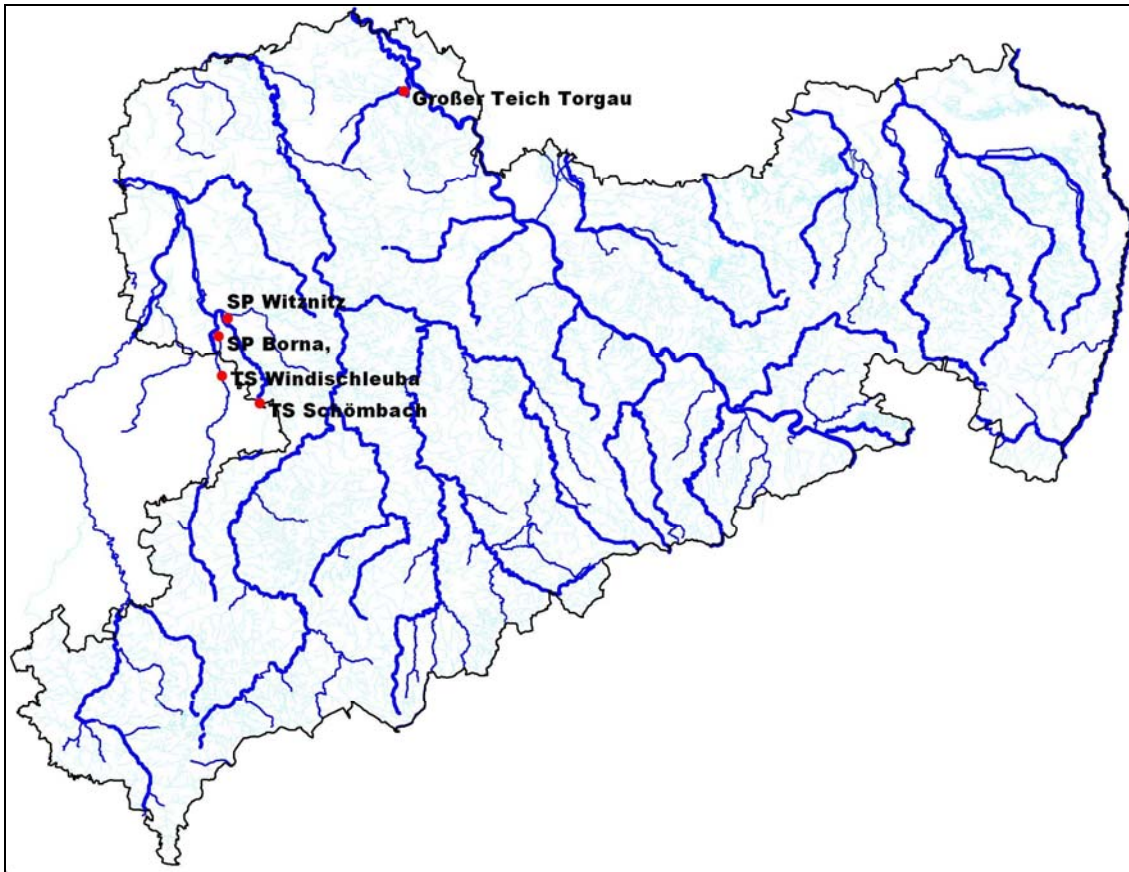


Abbildung 6: Lage der Talsperren und Speicherbecken, deren Daten im Rahmen der Studie beschafft wurden

3.2.2 Daten Kulkwitzer See der LD Leipzig

Im Kulkwitzer See werden seit den 1970er-Jahren von der SAW, der damaligen Oberflussmeisterei Leipzig, später von der BHI und der LUA Tiefenserien der Wasserbeschaffenheit aufgenommen. Dabei wird auch die Temperatur gemessen. Die Messung erfolgt ausgehend von der Oberfläche in 1-m-Schritten. Von der LD Leipzig wurden die verfügbaren digitalen Daten der Nordbucht und der Südbucht des Kulkwitzer Sees bereitgestellt. Die Profile umfassen Tiefen bis zu ca. 28 m (Nordbucht) bzw. 25 m (Südbucht) in Schritten von 1 m, teilweise auch größer.

Bei der Verwendung der Daten ist zu beachten, dass im Sommer 1996 eine Tiefenwasserbelüftungsanlage in Betrieb genommen wurde. Diese beeinflusst die Schichtungsverhältnisse vor allem in der Südbucht. Der Betrieb wurde auch in den Folgejahren fortgesetzt.

In die Datenbank aufgenommen wurden die Stammdaten und Messdaten, ergänzt um Clisax-Wetterdaten 1981-2003.

3.3 Wassertemperaturen Grundwasser

3.3.1 Daten des sächsischen Messnetzes Grundwassermessstellen des LfULG

Die Daten der 1.186 Messstellen (Abbildung 7) umfassen neben den Stammdaten (Messstellenart, Koordinaten und Geländehöhe, Ausbau, verfilterter Grundwasserkörper) die Grundwassertemperatur und die Messtiefe. Es sind jährlich i. d. R. nur wenige Messwerte vorhanden. Die Messungen gehen nur ausnahmsweise in den Zeitraum vor Mitte der 1990er-Jahre zurück.

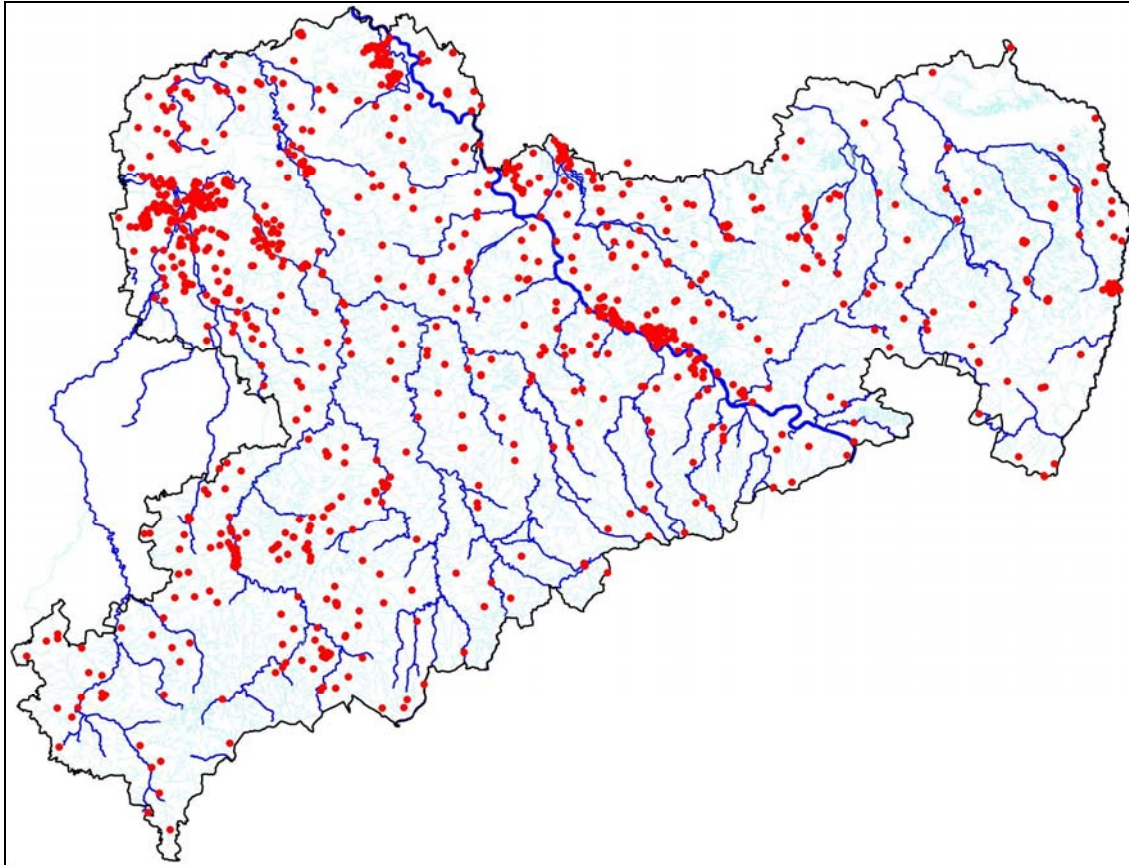


Abbildung 7: Lage der Grundwassermessstellen mit Temperaturdaten des LfULG

Bei der Plausibilitätskontrolle der Daten wurde häufig ein Sprung der Wassertemperatur um $+0.5\text{ °C}$ im Zeitraum etwa um 1998 festgestellt. Dieser ist wahrscheinlich auf die Umstellung auf Durchflussmesszelle bei den Grundwasser-Probenahmen zurückzuführen. Dies ist bei der Ableitung von Veränderungen der Grundwassertemperatur bzw. bei der ggf. durchzuführenden Modellkalibrierung zu berücksichtigen.

In die Datenbank aufgenommen wurden die Stammdaten und Messdaten, bereinigt um Ausreißer (271 Werte) und auf Plausibilität geprüft, ergänzt um Mittelwert, Streuung, Parameter des Jahresganges, Residuen, Mittelwert und Streuung der Residuen und Clisax-Wetterdaten 1981-2003.

3.3.2 Loggerdaten des LfULG

Seit Oktober 2006 werden an ausgewählten Messstellen der sächsischen Grund- und Sondermessnetze des Grundwassers Temperaturmessungen in hoher zeitlicher Auflösung mittels Datenlogger durchgeführt. Die Datenreihen dieser 92 Messstellen bis Anfang Oktober 2009 umfassen ca. 230.000 Datensätze. Aus den Daten wurden 59.597 Tagesmittelwerte der Grundwassertemperatur berechnet und in die Datenbank überführt. Die Lage der Messstellen ist in Abbildung 8 dargestellt.

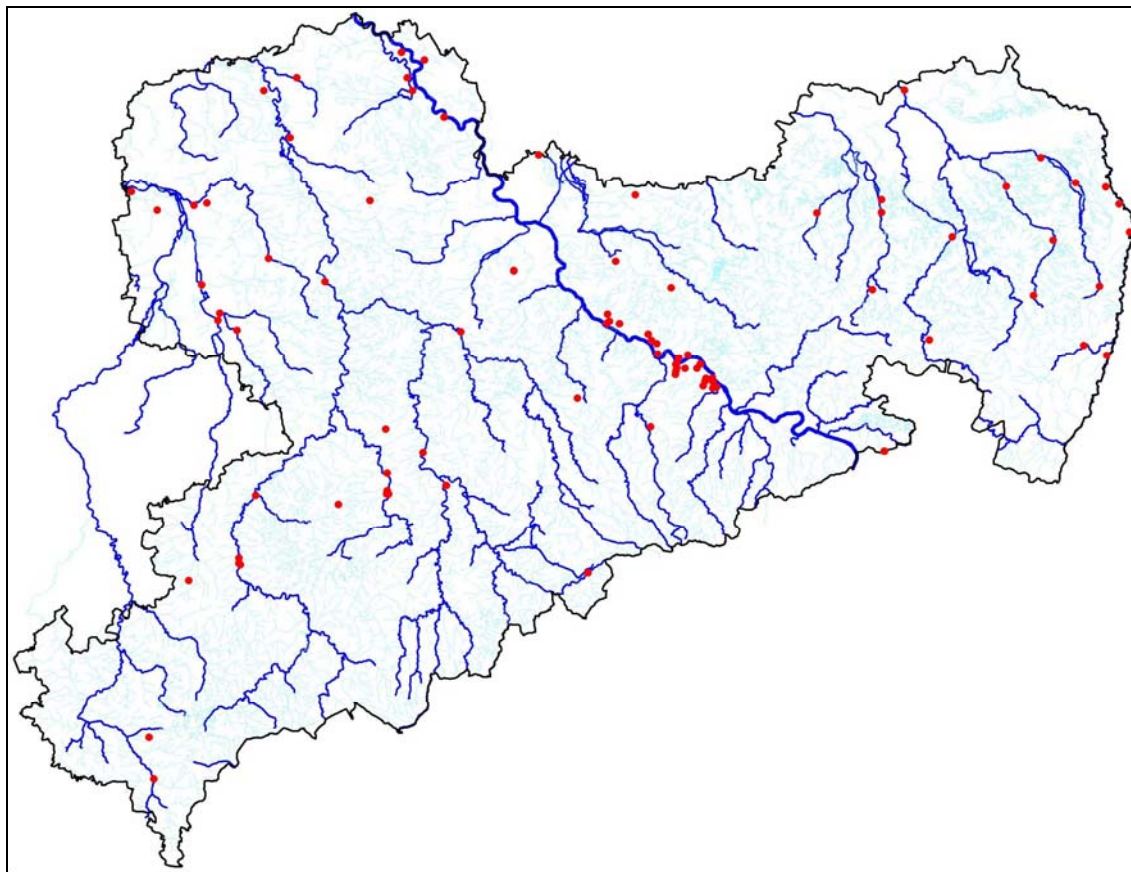


Abbildung 8: Pegel mit Datenloggern und Tagesreihen der Grundwassertemperatur aus WINSTYX

Den Messdaten wurden die Stammdaten der Messstellen zugeordnet. Weiterhin wurden die Jahresgänge mittels Winkelfunktion berechnet und insgesamt 55 Ausreißer entfernt. Weiterhin wurden die Klimagebiete den Messstellen zugeordnet. Eine Zuordnung der Klimadaten konnte nicht durchgeführt werden, weil diese bisher nur bis zum Jahr 2003 ausgewertet wurden.

In die Datenbank aufgenommen wurden die Stammdaten und Messdaten, bereinigt um Ausreißer (55 Werte) und auf Plausibilität geprüft, ergänzt um Mittelwert, Streuung, Parameter des Jahresganges, Residuen, Mittelwert und Streuung der Residuen und Klimagebiet (Klimadaten liegen außerhalb des Messzeitraumes). Die Rohdaten enthalten weitere Informationen zu den Messstellen (Stammdaten).

3.3.3 Daten der Wettin- und Eisenquelle Bad Brambach

Die Sächsische Staatsbäder GmbH, Staatsbad Bad Brambach, misst seit der Mitte der 1960er-Jahre die Temperatur der Quellen Wettinquelle und Eisenquelle. Ergänzend hierzu werden auch die Boden- und Lufttemperaturen gemessen (vgl. Abschnitt 3.4.5). Die Lage der Quellen ist in Abbildung 13 dargestellt. Es handelt sich um Quellaustritte oberflächennahen Grundwassers, welches geothermisch nicht beeinflusst ist.

Die Wettin- und Eisenquelle sind flach gefasste, CO₂-haltige Mineralquellen, die unter Flur frei auslaufen (Auskunft Dr. Ulrich Koch, SAW Bad Brambach). Die Fassungen sitzen in 5 m bis 6 m Tiefe unter Gelände auf dem geklüfteten Festgestein auf. Ihre Temperaturen folgen erfahrungsgemäß mit ca. zwei Monaten Verschiebung den Lufttemperaturen. Zu beachten ist, dass nach der Fassungsanierung der Wettinquelle (ca. ab Januar 2000) durch eine größere Edelstahlfassung, ein entsprechendes Leitungssystem sowie die notwendige Ventilationseinrichtungen generell etwas höhere Wassertemperaturen als bis 1999 gemessen werden (ca. 0,3 K bis 0,5 K, Auskunft Dr. Ulrich Koch, SAW Bad Brambach). Die Daten nach 2000 sollten u. U. nicht verwendet werden. Auch die Eisenquelle wurde 2003-2004 saniert (Datenausfall). Dort machen sich die neuen Fassungsbedingungen aber kaum bei der Wassertemperatur bemerkbar.

Die Daten wurden von der SAW, Arbeitsstelle Bad Brambach, übergeben. In die Datenbank aufgenommen wurden die Daten der Wettin- und Eisenquelle. Für die Wettinquelle sind 9.865 Datensätze vorhanden, davon 7.671 Datensätze vor 2000 und

2.194 Datensätze nach 2000. Die Daten der Eisenquelle umfassen 8.146 Datensätze. Die Daten umfassen einen ca. 43-jährigen Messzeitraum. In die Datenbank aufgenommen wurden die Stammdaten und Messdaten Wassertemperatur und Lufttemperatur. Daten bereinigt um Ausreißer (zwei Werte) und auf Plausibilität geprüft, ergänzt um Mittelwert, Streuung, Parameter des Jahresganges, Residuen, Mittelwert und Streuung der Residuen und Clisax-Wetterdaten 1981-2003.

3.3.4 Daten der Grundwassermessstellen der LD Chemnitz

Von der Landesdirektion Chemnitz wurden Stammdaten von Grundwassermessstellen sowie im Rahmen von Grundwasserprobenahmen gemessene Temperaturen bereitgestellt. Diese stammen aus hydrologischen Gutachten der ehemaligen Landkreise Stollberg, Mittweida und Chemnitzer Land und aus dem Einzugsgebiet des Kapelbaches/Chemnitz. Diese Daten liegen nicht im LfULG vor. Sie wurden im bis in die 1990er-Jahre zurückliegenden Zeitraum gewonnen. Für 560 der ca. 1.800 Messstellen liegen gemessene Wassertemperaturen vor. Für eine größere Anzahl an Messstellen sind dies nur ein bis drei Werte, für die meisten Messstellen nur fünf bis 10 Werte. Die Lage der Messstellen ist in Abbildung 9 dargestellt.

In die Datenbank aufgenommen wurden die Stammdaten und Messdaten Wassertemperatur. Daten bereinigt um Ausreißer (41 Werte) und auf Plausibilität geprüft, ergänzt um Mittelwert, Streuung, Parameter des Jahresganges, Residuen, Mittelwert und Streuung der Residuen und Clisax-Wetterdaten 1981-2003.

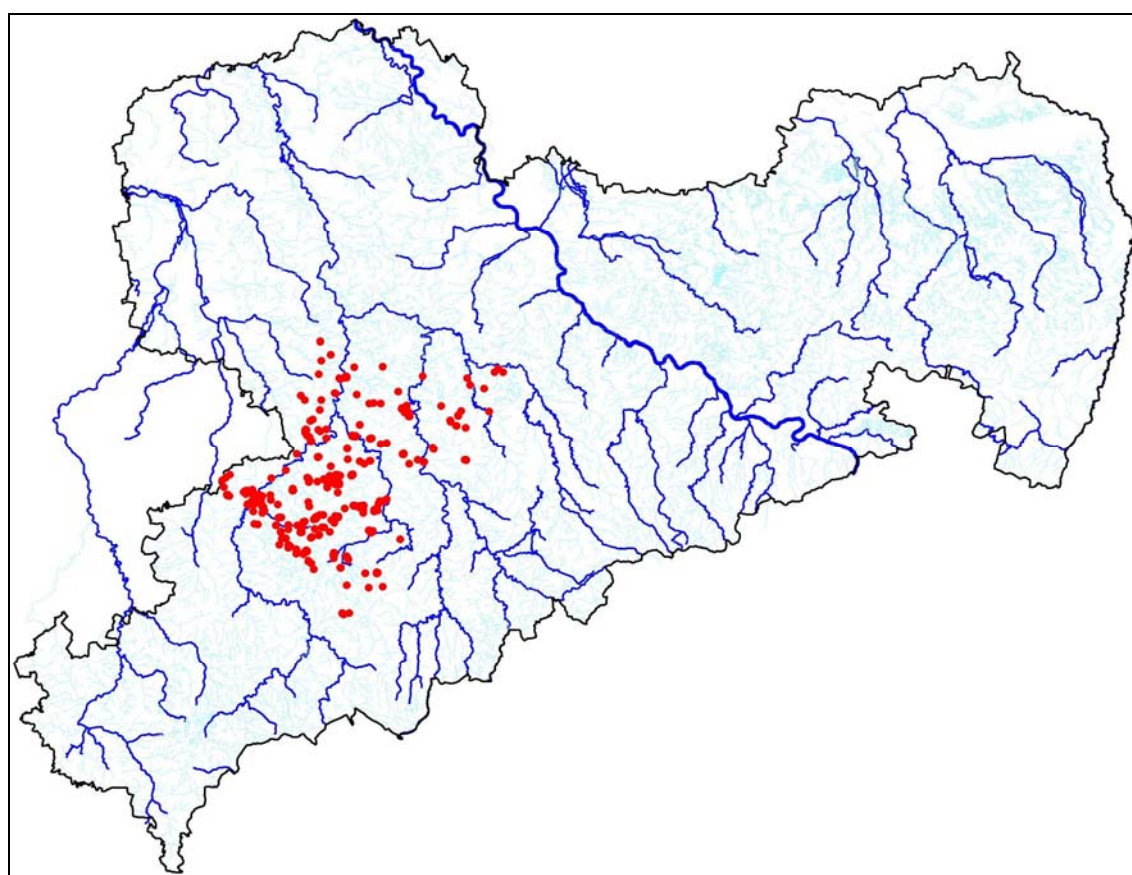


Abbildung 9: Lage der Messstellen mit Daten der LD Chemnitz

3.3.5 Daten des Umweltmonitorings der WISMUT GmbH

Die WISMUT-Umweltdatenbank umfasst neben Beschaffenheitsdaten des Oberflächenwassers auch Grundwasserbeschaffenheiten. Dabei handelt es sich um insgesamt 77 Messstellen im Anstrom, Bereich und Abstrom von Bergbauobjekten wie Halde, Betriebsanlagen und Absetzanlagen (siehe Abbildung 4). Die Datenbasis enthält 2.610 Messdaten einschließlich der Stamm- und Bewegungsdaten Wassertemperatur mit Angabe von Datum und Uhrzeit und teilweise auch Entnahmetiefe und Förderrate. Die Datenreihen gehen teilweise bis zum Jahr 1993 zurück.

In die Datenbank aufgenommen wurden die Stammdaten und Messdaten Wassertemperatur und Lufttemperatur. Daten bereinigt um Ausreißer (38 Werte) und auf Plausibilität geprüft, ergänzt um Mittelwert, Streuung, Parameter des Jahresganges, Residuen, Mittelwert und Streuung der Residuen und Clisax-Wetterdaten 1981-2003.

3.4 Wassertemperaturen Bodenwasser

Die Bodenwassertemperatur entspricht der Bodentemperatur in der gemessenen Tiefe. Bodentemperaturen werden an einigen meteorologischen Stationen des DWD gemessen. Diese Daten sind kostenpflichtig. Weiterhin wird die Bodentemperatur an den meteorologischen Stationen der Level-II-Dauerbeobachtungsflächen des SBS, im Rahmen des agrarmeteorologischen Messnetzes des LfULG, an den Bodendauerbeobachtungsflächen des LfULG und an bodenhydrologischen Messflächen weiterer Betreiber gemessen.

3.4.1 Daten des agrarmeteorologischen Messnetzes des LfULG

Vom LfULG wird ein agrarmeteorologisches Messnetz betrieben. Dieses besteht derzeit aus 14 fernmeldenden automatischen meteorologischen Stationen.

In der vorliegenden Studie wurden die genannten Messgrößen mit Ausnahme der Windrichtung und der Bodensaugspannung als Tagesmittelwerte der folgenden agrarmeteorologischen Stationen integriert:

| | | |
|-----|-----------------|-----------------|
| L01 | Leipzig-Möckern | 01/1994-09/2009 |
| L02 | Methau | 01/1994-09/2009 |
| L03 | Christgrün | 02/1995-09/2009 |
| L04 | Lampertswalde | 01/2002-09/2009 |
| L05 | Roda | 12/1994-09/2009 |
| L07 | Salbitz | 04/1994-09/2009 |
| L08 | Forchheim | 01/1995-09/2009 |
| L09 | Köllitsch | 04/1994-09/2009 |
| L10 | Spröda | 08/1994-09/2009 |
| L11 | Pommritz | 07/1994-09/2009 |
| L12 | Preititz | 04/1996-09/2009 |
| L13 | Nossen | 01/1999-09/2009 |
| L14 | Bergen | 01/2007-09/2009 |
| L16 | Baruth | 01/2008-09/2009 |

Die Stationen sind in der Übersichtskarte Abbildung 10 dargestellt.

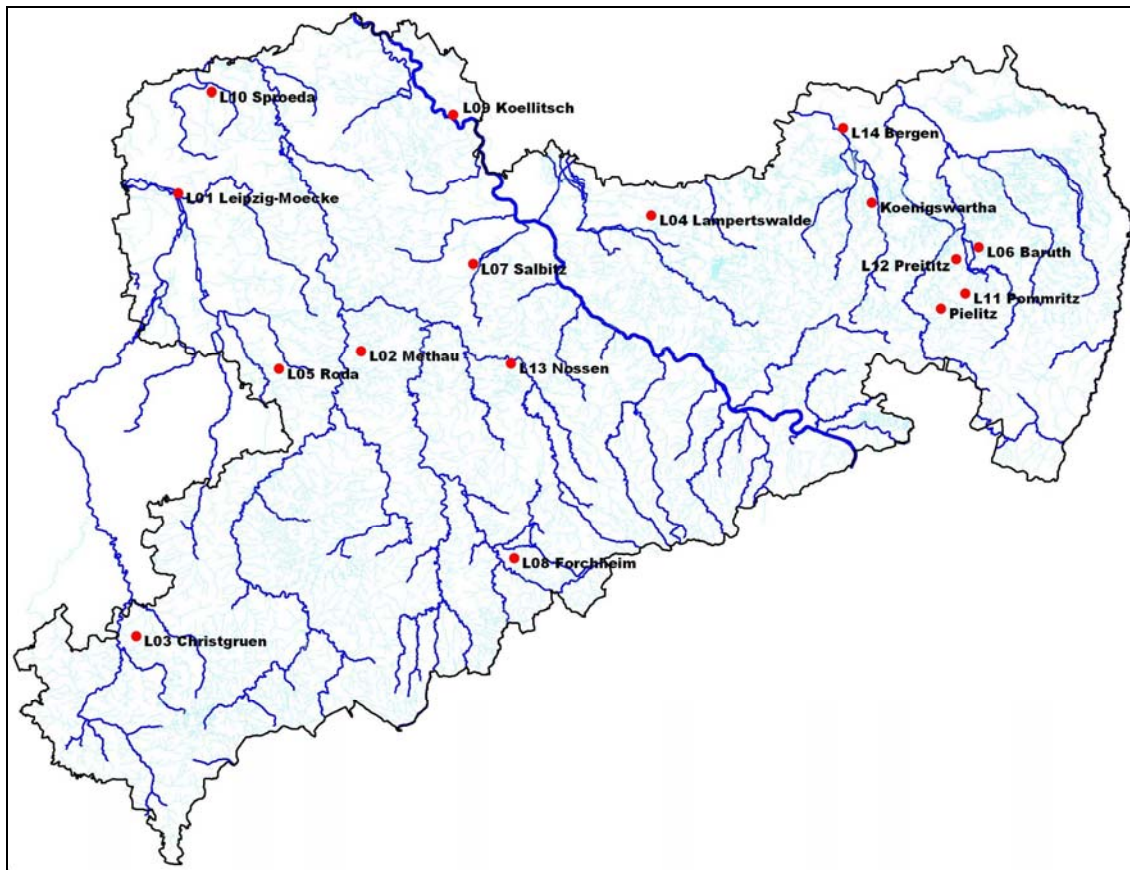


Abbildung 10: Stationen des agrarmeteorologischen Messnetzes des LfULG

An den Stationen werden folgende Daten erhoben:

- Lufttemperatur in 0.2 m und 2 m Höhe [°C]
- Bodentemperatur in 0.2 m und 2 m Tiefe [°C]
- relative Luftfeuchte in 2 m Höhe [%]
- Blattbenetzung in 1 m Höhe [%]
- Globalstrahlung in 2 m Höhe [W/m²]
- Niederschlag in 1 m Höhe [mm]
- Windgeschwindigkeit in 2.5 m Höhe [m/s]
- Windrichtung in 2.5 m Höhe [1-16]
- Bodensaugspannung in 0.3 m und 0.6 m Tiefe [kPa] an einigen Stationen während der Vegetationszeit

In die Datenbank aufgenommen wurden die Stammdaten und Messdaten, bereinigt um Ausreißer und auf Plausibilität geprüft, ergänzt um Mittelwert, Streuung, Parameter des Jahresganges, Residuen, Mittelwert und Streuung der Residuen und Clisax-Wetterdaten 1981-2003.

3.4.2 Daten der Lysimeterstation Brandis der BfUL

Die Lysimeter der Station Brandis (Abbildung 11) werden als Messnetz „Bodenwasserhaushalt“ im Rahmen der gewässerkundlichen Messnetze des Freistaates Sachsen betrieben. Gemessen werden seit 1980 neben Verdunstung, Versickerung, Bodenwasservorrat und Sickerwassergüte auch die Bodentemperaturen. Der Betrieb der Station sowie die Auswertung der Ergebnisse obliegen seit 1995 der BfUL.

Die Station besteht aus 24 wägbaren Lysimetern, welche aus jeweils drei Bodenmonolithen von acht unterschiedlichen Standorten bestehen. Die Lysimeterböden werden einschließlich des umliegenden Feldes landwirtschaftlich genutzt. Dabei werden alle Lysimeter gleich behandelt. Weiterhin werden 19 Versickerungsmesser und eine Wetterstation betrieben.

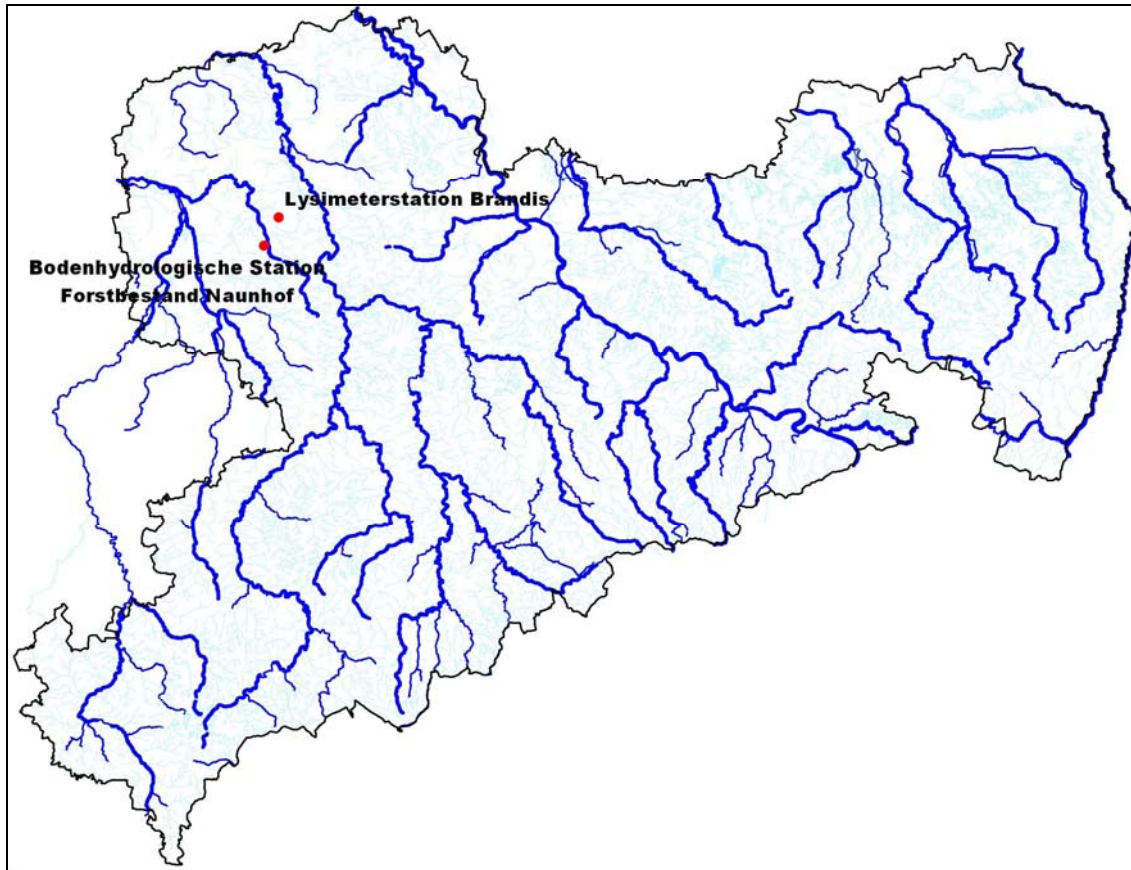


Abbildung 11: Lage der Lysimeterstation Brandis und der Station Naunhof

In der vorliegenden Studie wurden Tagesmittelwerte der Bodentemperatur in 5 cm, 10 cm, 20 cm, 50 cm, 100 cm und 250 cm Tiefe in die Datenbank aufgenommen. Die Daten überstreichen den Zeitraum von Mai 1992 bis März 2009 (250 cm: Mai 1996 bis März 2009). Die Messungen erfolgen außerhalb des Bereiches des Lysimeterkellers auf freiem Feld. Weiterhin wurden die gemessenen meteorologischen Daten der Lysimeterstation in die Datenbank integriert.

In die Datenbank aufgenommen wurden die Stammdaten und Messdaten, bereinigt um Ausreißer und auf Plausibilität geprüft, ergänzt um Mittelwert, Streuung, Parameter des Jahresganges, Residuen, Mittelwert und Streuung der Residuen und Clisax-Wetterdaten 1981-2003.

Bei der BfUL liegen weiterhin detaillierte Informationen zu Pflanzendecke und Bewirtschaftung, Bodenwasserdynamik, Sickerwassermenge und -qualität und zum Wasserhaushalt vor.

3.4.3 Daten der Bodenhydrologischen Station Forstbestand Naunhof der BfUL

Die Lage der Bodenhydrologischen Station Forstbestand Naunhof ist in Abbildung 11 dargestellt. An der Station, die einen Waldbestand (Altholz) repräsentiert, werden der Niederschlag, die Bodenfeuchte in unterschiedlichen Tiefen und die Bodentemperatur gemessen und zwei Lysimeter betrieben. Die Beschaffenheit des Sickerwassers wird untersucht. Für die vorliegende Vorstudie wurden von der BfUL die gemessenen Bodentemperaturen in den Tiefen 10 cm, 20 cm, 30 cm, 40 cm, 60 cm und 100 cm als Tagesmittelwerte zur Verfügung gestellt.

In der Datenbank enthalten sind die Tagesmittelwerte der Bodentemperatur in den genannten Tiefen, Zeitraum 02/2007 bis 11/2009 (10 cm: ohne hydrologisches Jahr 2008), bereinigt um Ausreißer und auf Plausibilität geprüft, ergänzt um Mittelwert, Streuung, Parameter des Jahresganges, Residuen, Mittelwert und Streuung der Residuen und Clisax-Wetterdaten 1981-2003.

3.4.4 Daten der Level-II-DBF des Staatsbetriebes Sachsenforst

Im Rahmen des europaweiten Level-II-Waldzustandsmonitorings betreibt der Staatsbetrieb Sachsenforst acht Dauerbeobachtungsflächen (Abbildung 12).

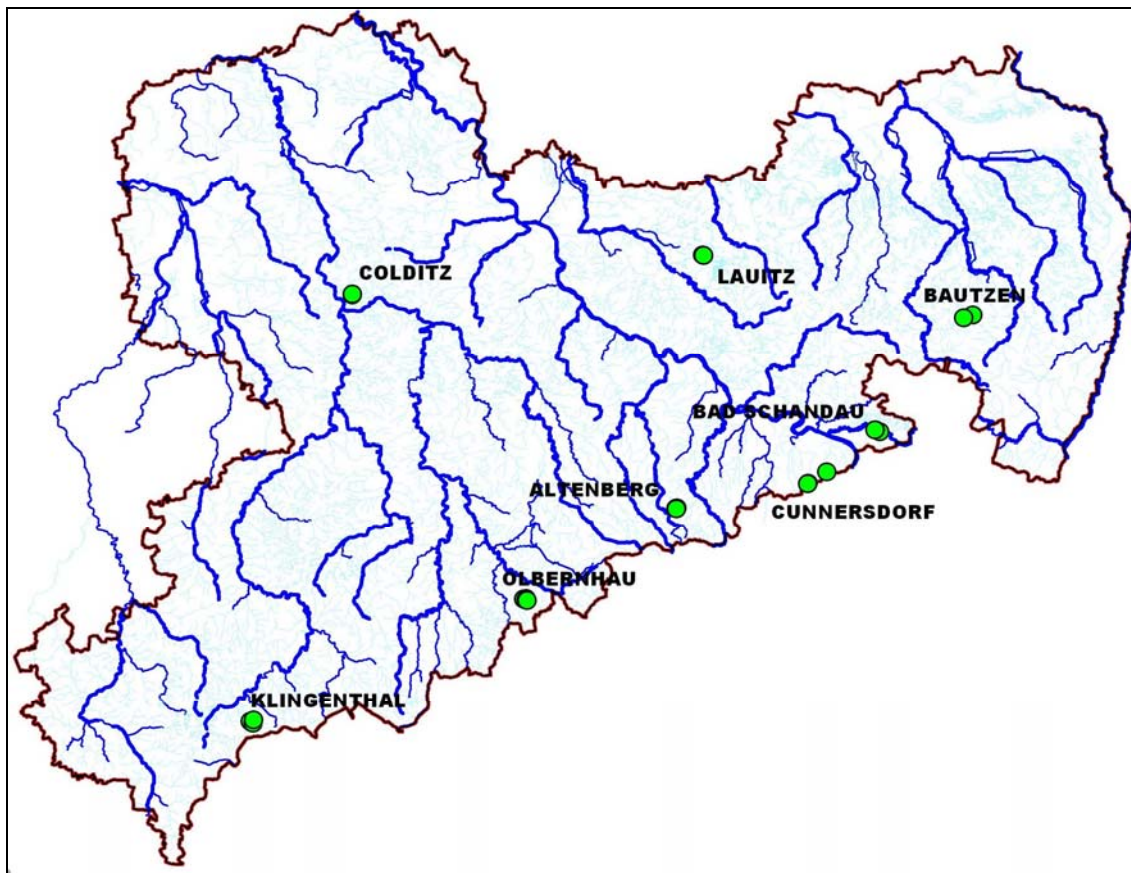


Abbildung 12: Level-II-Dauerbeobachtungsflächen des Staatsbetriebes Sachsenforst

Auf diesen Dauerbeobachtungsflächen, welche i. d. R. aus mehreren Teilflächen bestehen, die sich hinsichtlich des Waldbestandes unterscheiden, werden neben dem Waldzustand auch meteorologische Daten und Bodendaten wie Saugspannung, Wassergehalt und Bodentemperaturen gemessen. Die Bodentemperaturen wurden nur zeitweise von den meteorologischen Stationen erfasst. Für die Bearbeitung der vorliegenden Studie wurden vom SBS die Messdaten der meteorologischen Stationen (Lufttemperatur, Luftfeuchte, Niederschlag, Globalstrahlung, Windgeschwindigkeit) bereitgestellt. Dabei handelt es sich um Daten, die bereits eine Homogenisierung und Plausibilitätsprüfung durchlaufen haben und die als Input für ein Wasserhaushaltsmodell verwendet wurden. Der Niederschlag ist im Gegensatz zu reinen Messdaten bereits korrigiert.

In die Datenbank aufgenommen wurden die Stammdaten und meteorologische Messdaten, auf Plausibilität geprüft, ergänzt um die Clisax-Wetterdaten 1981-2003.

Beim SBS liegen weiterhin gemessene Bodentemperaturen der meteorologischen Stationen der Freiflächen vor.

3.4.5 Daten der Sächsischen Akademie der Wissenschaften Bad Brambach

Von der Sächsischen Akademie der Wissenschaften zu Leipzig (SAW), Arbeitsstelle Bad Brambach (Abbildung 13), werden in Ergänzung zu den Messungen der Quellentemperaturen (Wetтинquelle, Eisenquelle) auch Luft- und Bodentemperaturen gemessen. Die Tagesmittelwerte der Lufttemperaturen (2 m Höhe) liegen seit Juni 1985 vor, die der Bodentemperatur seit September 1988. Die Bodentemperatur wird in 50 cm Tiefe unter Gelände gemessen.

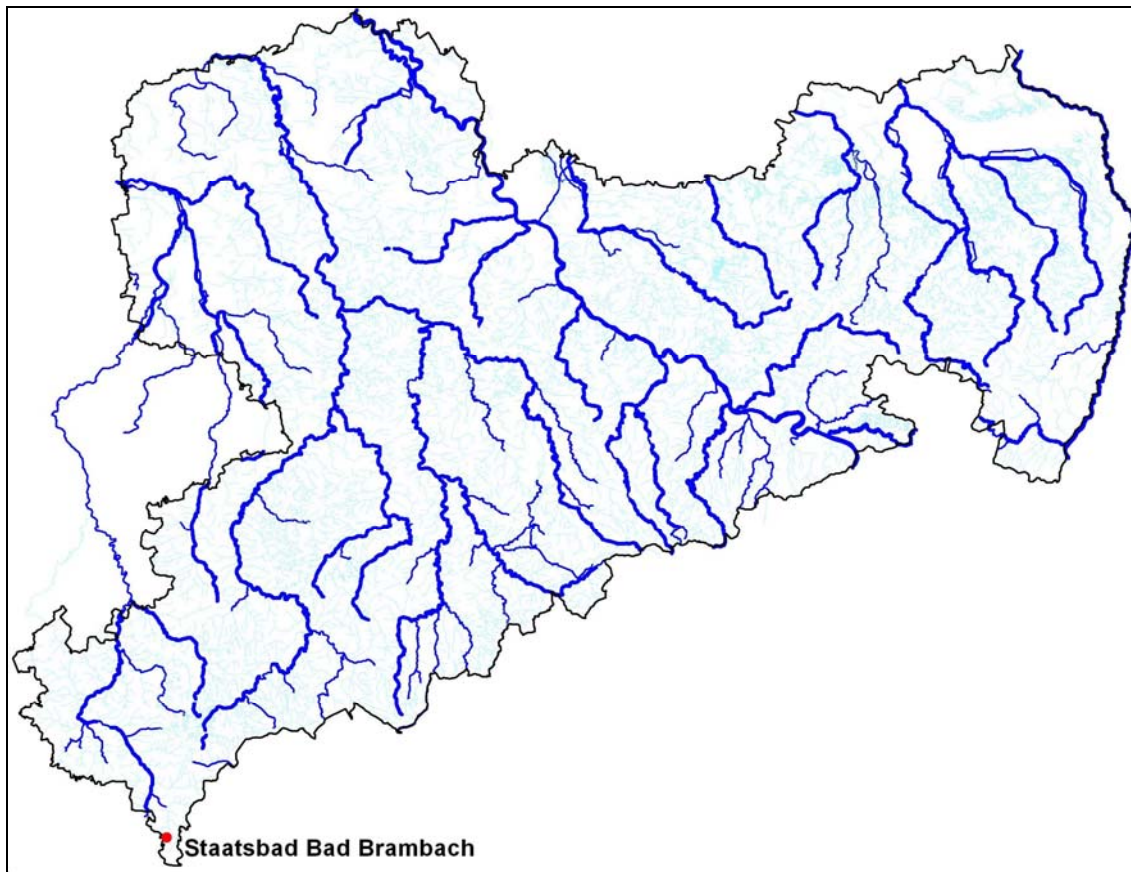


Abbildung 13: Lage der Messstelle Bad Brambach

In die Datenbank übernommen wurden die Tagesmittelwerte der Bodentemperatur in 50 cm Tiefe und Lufttemperatur, Zeitraum 09/1988 bis 09/2009, bereinigt um Ausreißer und auf Plausibilität geprüft, ergänzt um Mittelwert, Streuung, Parameter des Jahresganges, Residuen, Mittelwert und Streuung der Residuen und Clisax-Wetterdaten 1981-2003. Die Rohdaten umfassen die Lufttemperatur ab Juni 1985.

3.4.6 Daten der bodenhydrologischen Messflächen der WISMUT GmbH

Die WISMUT GmbH führt in Ergänzung des planmäßigen Umweltmonitorings zum Stoffaustrag aus Halden, Absetzanlagen und Grubenbauen hydrologische Sondermessungen durch. Diese Sondermessungen dienen der Quantifizierung der Niederschlagsversickerung durch aufgebrauchte bzw. erstbegrünte Haldenabdeckungen sowie zur Beschreibung des Bodenwasserhaushaltes der Abdecksysteme von Bergehalden und Absetzanlagen. Installiert wurden i. d. R. Messsonden für die Bodensaugspannungen (Tensiometer, Equitensiometer), für den Bodenwassergehalt (TDR-Sonden, FDR-Sonden) und die Bodentemperatur (PT100-Widerstandsthermometer). Die Daten werden mittels Datenlogger aufgezeichnet. Weiterhin werden an einigen Standorten dieser bodenhydrologischen Messflächen Lysimeter zur Erfassung der Sickerwassermenge betrieben. Die Standorte der bodenhydrologischen Messflächen sind in der Abbildung 14 dargestellt.



Abbildung 14: Standorte der bodenhydrologischen Messflächen der WISMUT GmbH

WISMUT GmbH, bodenhydrologische Messfläche Halde Borbachdamm

Die bodenhydrologische Messfläche dient dem Nachweis der hydrologischen Wirkung der Haldenabdeckung und deren Einfluss auf den Stoffaustrag. Sie befindet sich auf der sanierten, d. h. abgedeckten und begrünter Halde Borbachdamm im Raum Schlema-Alberoda. Seit November 1999 werden auf der Messfläche in den Tiefen 40 cm und 80 cm Daten der Bodentemperatur, Saugspannung und des Wassergehaltes in hoher zeitlicher Auflösung erfasst. In der Datenbank enthalten sind die Tagesmittelwerte der Bodentemperatur, berechnet aus 10-minütigen Messwerten in 40 cm und 80 cm Tiefe, Zeitraum 11/99 bis 03/09, bereinigt um Ausreißer und auf Plausibilität geprüft, ergänzt um Mittelwert, Streuung, Parameter des Jahresganges, Residuen, Mittelwert und Streuung der Residuen und Clisax-Wetterdaten 1981-2003.

In den Rohdaten sind jeweils vier Messwerte pro Tag und Sonde enthalten, weiterhin die daraus berechnete mittlere Bodentemperatur nach Bereinigung der Daten.

WISMUT GmbH, bodenhydrologische Messfläche Halde 366

Die bodenhydrologische Messfläche dient dem Nachweis der hydrologischen Wirkung der Haldenabdeckung und deren Einfluss auf den Stoffaustrag. Die Messfläche befindet sich auf der 40 % geneigten WSW-Böschung der sanierten und abgedeckten Halde 366 der WISMUT GmbH im Raum Schlema-Alberoda. Die Messungen umfassen die Bodentemperatur, Saugspannung und den Wassergehalt in 40 cm und 80 cm Tiefe, den Niederschlag (Hellmann-Regenmesser) und Sickerwassermengen (Großlysimeter) in hoher zeitlicher Auflösung. In der Datenbank enthalten sind die Tagesmittelwerte der Bodentemperatur, berechnet aus 10-minütigen Messwerten in 40 cm und 80 cm Tiefe, Zeitraum 11/04 bis 03/09, bereinigt um Ausreißer und auf Plausibilität geprüft, ergänzt um Mittelwert, Streuung, Parameter des Jahresganges, Residuen, Mittelwert und Streuung der Residuen und Clisax-Wetterdaten 1981-2003.

In den Rohdaten sind Tagesmittelwerte der Einzelsonde enthalten, weiterhin die daraus berechnete mittlere Bodentemperatur nach Bereinigung der Daten.

WISMUT GmbH, bodenhydrologische Messfläche Halde 371/II

Von der WISMUT GmbH wurde vom November 1999 bis Februar 2004 auf einer Versuchsfläche auf der Halde 371/II ein bodenhydrologischer Messplatz betrieben. Dieser befand sich auf einer versuchsweise abgedeckten Böschung. Es wurden kontinuierlich Daten zu Saugspannung, Wassergehalt und Temperatur im Boden erhoben und Lysimetermessungen durchgeführt. In der Datenbank enthalten sind die Tagesmittelwerte der Bodentemperatur, berechnet aus Stundenmittelwerten in 15 cm, 40 cm und 80 cm Tiefe, Jahr 2003, bereinigt um Ausreißer und auf Plausibilität geprüft, ergänzt um Mittelwert, Streuung, Parameter des Jahresganges, Residuen, Mittelwert und Streuung der Residuen und Clisax-Wetterdaten 1981-2003.

In den Rohdaten sind die stündlichen Messwerte der einzelnen Sonden enthalten. Weitere Daten liegen bei WISMUT GmbH vor: November 1999-Dezember 2002 (Daten nicht in die Datenbank integriert).

WISMUT GmbH, bodenhydrologische Messfläche Crossen

Die Messfläche wurde zur Untersuchung der wasserhaushaltlichen Wirkung eines Laubholz-Altbestandes am Standort der zu sanierenden Industriellen Absetzanlagen Helmsdorf/Dänkriz I errichtet. Es sollte die Möglichkeit untersucht werden, die Sickerwasserneubildung auf den Absetzanlagen mittels eines mehrschichtigen Waldbewuchses zu reduzieren. Die Messungen von Bodentemperatur, Saugspannung, Wassergehalt und Sickerwasserrate wurden in den Tiefen 20 cm, 50 cm, 100 cm und 250 cm im Zeitraum August 2003 bis August 2008 mit hoher zeitlicher Auflösung durchgeführt. In der Datenbank enthalten sind die Tagesmittelwerte der Bodentemperatur, berechnet aus Stundenmittelwerten in 20 cm, 50 cm, 100 cm und 250 cm Tiefe der im Zeitraum 08/2003-08/2008, bereinigt um Ausreißer und auf Plausibilität geprüft, ergänzt um Mittelwert, Streuung, Parameter des Jahresganges, Residuen, Mittelwert und Streuung der Residuen und Clisax-Wetterdaten 1981-2003. Die Rohdaten umfassen die stündlichen Messwerte.

WISMUT GmbH, Testfeld Halde Schüsselgrund

Das Testfeld wurde errichtet, um die langzeitliche wasserhaushaltliche Wirkung der geplanten Haldenabdeckung und deren Einfluss auf den Stoffaustausch zu untersuchen. Die Messungen von Bodentemperatur, Saugspannungen, Sickerwassermengen und der Wetterdaten werden seit Dezember 1999 durchgeführt und dauern bis heute an. In der Datenbank enthalten sind die Tagesmittelwerte der Bodentemperatur, berechnet aus 10-Minuten-Werten und Stundenmittelwerten in 50 cm, 100 cm und 150 cm Tiefe, Zeitraum 11/2001 bis 09/2009, bereinigt um Ausreißer und auf Plausibilität geprüft, ergänzt um Mittelwert, Streuung, Parameter des Jahresganges, Residuen, Mittelwert und Streuung der Residuen und Clisax-Wetterdaten 1981-2003. Die Rohdaten umfassen die Messwerte in 10-minütiger bis stündlicher Auflösung.

3.5 Klimadaten

Im Rahmen der Datenrecherche wurden folgende Klimadaten gesammelt (jeweils Lufttemperatur, Luftfeuchte, Niederschlag, Globalstrahlung/Sonnenscheindauer und Windgeschwindigkeit):

- Messdaten von 21 Stationen in Sachsen und angrenzenden Gebieten 1961-2009 (Datenquelle CLISAX)
- Projektionsdaten von 21 Stationen in Sachsen aus WEREX IV: Kontrollklimadaten 1961-2000 und Prognose 2041-2060, jeweils Szenario A1B
- Messdaten von 21 Stationen in Sachsen und angrenzenden Gebieten 1981-2003 (BfÖS 2006, Datenquelle CLISAX)
- interpolierte Messdaten der Klimastationen im EZG der Parthe und angrenzenden Gebieten aus dem Datenpaket des Projektes KliWEP (LfULG 2009) (interpolierte Tagesreihen für 17 Standorte im EZG der Parthe 1980-2006)
- interpolierte WEREX-IV-Projektionsdaten aus dem Datenpaket des Projektes KliWEP (LfULG 2009) (interpolierte Tagesreihen für 17 Standorte im EZG der Parthe 2007-2100)
- Messdaten der Lysimeterstation Brandis
- Messdaten der acht Level-II-Dauerbeobachtungsflächen des SBS
- gemessene Lufttemperaturen Bad Brambach der SAW 01.06.1985 - 27.09.2009
- Messdaten der 14 Stationen des agrarmeteorologischen Messnetzes

Weiterhin stehen Daten zur Verfügung, die in der Vorstudie nicht beschafft werden konnten:

- Datenservice „Rasterklimadaten“ RaKliDa der TU Dresden (im Aufbau)

Beobachtungsdaten 1961-2009 und WEREX-IV-Projektionsdaten

Die in der Vorstudie gesammelten Klimadaten umfassen die Messdaten 1961-2009 (Datenquelle CLISAX) und die WEREX-IV-Projektionsdaten, Szenario A1B, Bearbeitungsstand Oktober 2009, der folgenden Klimastationen (Abbildung 15):

Tabelle 11: Meteorologische Stationen mit Datenübergabe Messdaten und WEREX-IV-Projektion

| Name | Land | RW | HW | Hoehe | Art |
|----------------------|------|---------|---------|-------|------|
| Ceska Lipa | CZ | 4678800 | 5617800 | 252 | klim |
| Cheb | CZ | 4527100 | 5548000 | 471 | klim |
| Chemnitz | SN | 4561300 | 5629500 | 418 | klim |
| Cottbus | BB | 4660000 | 5739600 | 70 | klim |
| Doberlug-Kirchhain | BB | 4609300 | 5724900 | 100 | klim |
| Dresden-Klotzsche | SN | 4622400 | 5667300 | 222 | klim |
| Eisleben-Helfta | ST | 4470100 | 5707100 | 146 | klim |
| Fichtelberg | SN | 4567400 | 5588500 | 1213 | klim |
| Gera-Leumnitz | TH | 4509100 | 5638100 | 311 | klim |
| Görlitz | SN | 4706200 | 5674500 | 238 | klim |
| Hof-Hohensaas | BY | 4491400 | 5575800 | 567 | klim |
| Jablonne Podjettedi | CZ | 4695300 | 5629500 | 320 | klim |
| Jonsdorf, Kurort | SN | 4690000 | 5638200 | 460 | nied |
| Leipzig | SN | 4529200 | 5687100 | 141 | klim |
| Leipzig-Schkeuditz | SN | 4515900 | 5699300 | 141 | nied |
| Marienberg | SN | 4581200 | 5613100 | 639 | klim |
| Nova Ves v Horach | CZ | 4604700 | 5608000 | 726 | klim |
| Plauen | SN | 4509200 | 5593600 | 386 | klim |
| Torgau | SN | 4569200 | 5716400 | 80 | klim |
| Varnsdorf | CZ | 4684100 | 5645800 | 338 | klim |
| Zinnwald-Georgenfeld | SN | 4623500 | 5622900 | 877 | klim |

mit klim Klimastation (T, P, S, rel. F., v_{Wind})

nied Niederschlagsstation

Koordinaten: Gauß-Krüger, Zone 4

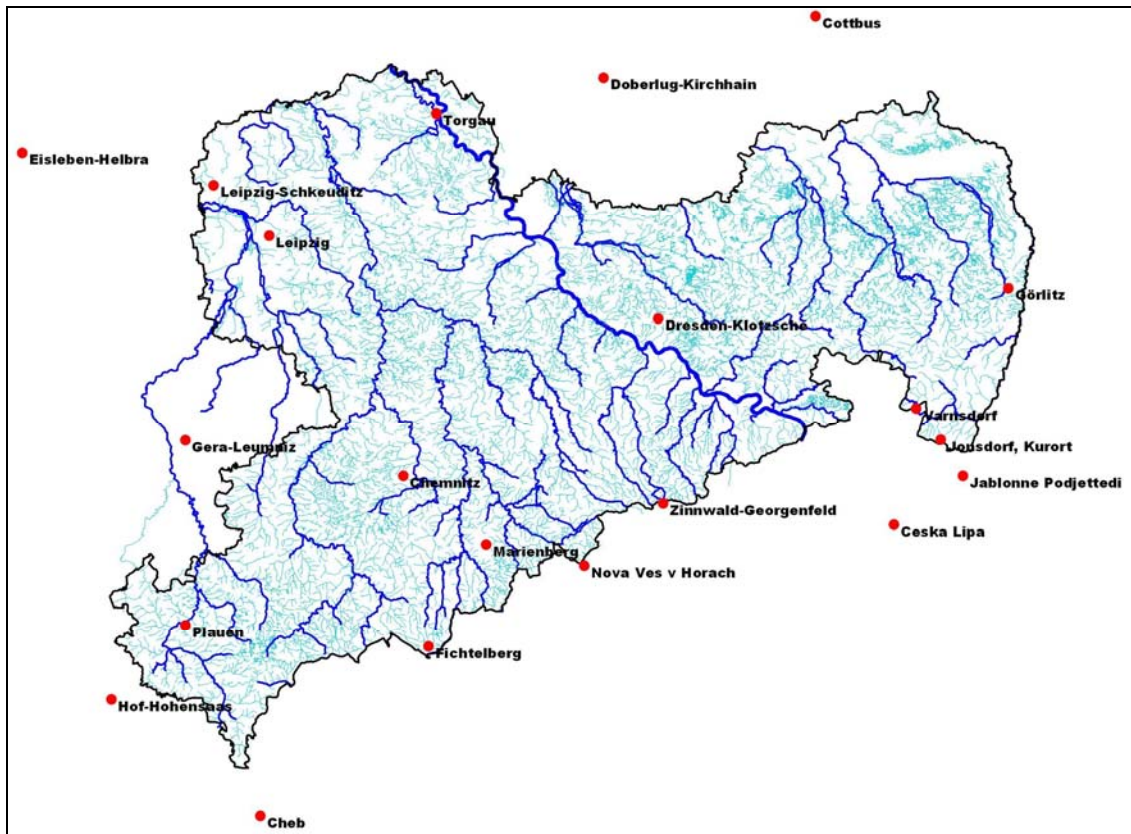


Abbildung 15: Meteorologische Stationen mit Beobachtungs- und Projektionsdaten

Die Daten können verwendet werden, um Interpolationen für jeden beliebigen Standort in Sachsen durchzuführen (Abschnitt 3.6).

Die WEREX-IV-Datenprojektion liegt beim LfULG für alle Dekaden 1961-2100 in jeweils 10-facher Wiederholung vor. Um diese Datenmenge zu reduzieren, wurden vom LfULG nur drei Wiederholungen, die jeweils feuchteste, mittlere und trockenste Simulation, übergeben. Damit liegt sowohl die Projektion für mittlere Bedingungen vor als auch eine Bandbreite hinsichtlich des Wasserdargebots.

Die WEREX-IV-Daten der Station Marienberg stammen aus einer älteren WEREX-IV-Version und sind möglicherweise im konkreten Witterungsverlauf nicht konsistent mit den anderen Stationen. Vor Verwendung der Datenreihen Marienberg sollte geprüft werden, ob sich deren Zeitverlauf vom Witterungsgeschehen der anderen Stationen grundlegend unterscheidet. Weiterhin sollten die Datenreihen Marienberg auf Plausibilität geprüft werden.

Die WEREX-IV-Daten der Kontrollläufe entsprechen im Zeitraum 1961-1990 den Beobachtungsdaten. Die Temperatur der Beobachtungsdaten 1991-2000 liegt bereits wesentlich höher als das Kontrollklima in dieser Zeit.

Beobachtungsdaten 1981-2003

Für erste statistische Auswertungen ohne aufwändige Interpolation meteorologischer Datenreihen lagen die Messdaten der in Tabelle 11 genannten Stationen des Zeitraums 1981-2003 aus einem früheren Projekt vor (BfÖS 2006, Datenquelle CLISAX, LfUG). Diese Daten wurden im Rahmen der Vorstudie regionalisiert (Abschnitt 3.6) und den Datensätzen der Wassertemperatur der Projektdatenbank sachsenweit zugeordnet.

Klimadaten des KliWEP-Projektes

Das Datenpaket des KliWEP-Projektes (LfULG 2008b) enthält Messdaten von 1980 bis 2006 und Daten der WEREX-IV-Projektion bis 2100 der Szenarien B1, A2 und A1B (Tabelle 15). Bei den Messdaten handelt es sich um interpolierte Daten auf der Grundlage der Station Leipzig-Schkeuditz, Leipzig-Holzhausen und Oschatz, der Messdaten der Lysimeterstation Brandis,

der gemessenen Niederschlagshöhen der Stationen Glasten, Naunhof, Pomßen und Fuchshain. Die Interpolation wurde durchgeführt für die folgenden Standorte (Abbildung 16):

| | | |
|------------|---------------|-----------|
| Ammelshain | Großbarda | Glasten |
| Ballendorf | Großsteinberg | Naunhof |
| Beiersdorf | Jesewitz | Fuchshain |
| Bernbruch | Rohrbach | Pomßen |
| Brandis | Sermuth | Taucha |
| Grethen | Threna | |

Bei den dokumentierten Daten handelt es sich somit nicht um die tatsächlich gemessenen Datenreihen, sondern um interpolierte Daten. Bei der Interpolation werden die an konkreten Standorten gemessenen Daten leicht verändert, sodass die Datenreihen der Standorte Brandis, Glasten, Naunhof, Pomßen und Fuchshain nicht exakt mit den Messreihen übereinstimmen.

Für die genannten Standorte liegen im Zeitraum 1980-2006 interpolierte Tagesreihen der folgenden Größen vor:

- Lufttemperatur
- Niederschlag
- Luftfeuchte
- Sonnenscheindauer
- Windgeschwindigkeit

Enthalten sind weiterhin die auf die genannten Standorten interpolierten WEREX-IV-Projektionsdaten des Zeitraumes 2007-2100.

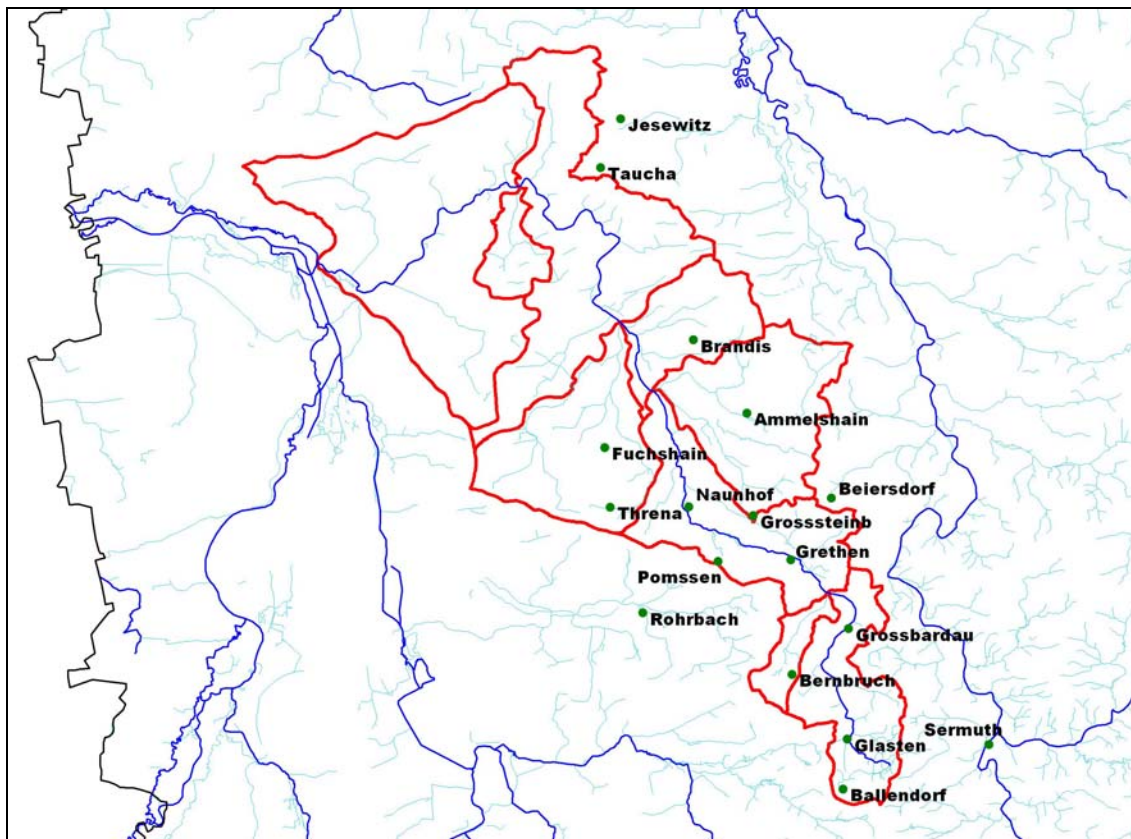


Abbildung 16: Lage der Wetterstationen mit Daten aus dem Projekt KliWEP

Messdaten der Lysimeterstation Brandis

Die Lysimeterstation Brandis ist mit einer Wetterstation ausgerüstet, an der die Parameter Lufttemperatur, Luftfeuchte, Globalstrahlung, Sonnenscheindauer, Niederschlag mittels Kippwaage und Ombrometer, Schneehöhe und Windgeschwindigkeit gemessen und die potenzielle Verdunstung berechnet. Die Daten wurden in die Datenbank der Bodenwassertemperaturen aufgenommen.

Messdaten der Level-II-Dauerbeobachtungsflächen des SBS

Die Messdaten der Level-II-DBF umfassen die Parameter Niederschlag, Lufttemperatur, Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit und Globalstrahlung. Letztere wurde aus der Sonnenscheindauer berechnet. Die Daten der Tagesreihen für den Zeitraum 1997-2007 wurden auf Plausibilität geprüft und für die Verwendung als Input für das Wasserhaushaltmodell CoupModel aufbereitet.

Gemessene Lufttemperatur Bad Brambach des SAW

Die in 2 m Höhe gemessene Lufttemperatur liegt in Form einer Tagesreihe für den Zeitraum Juni 1985 bis September 2009 vor.

Messdaten der 14 Stationen des agrarmeteorologischen Messnetzes

An den Lambrecht-Stationen des agrarmeteorologischen Messnetzes werden u. a. die Parameter Lufttemperatur (0.2 m und 2 m Höhe), Luftfeuchte (2 m Höhe), Globalstrahlung (2 m Höhe), Niederschlag (1 m Höhe), Windgeschwindigkeit und Windrichtung (2.5 m Höhe) gemessen. Die Daten wurden in die Datenbank der Bodenwassertemperaturen integriert, d. h. den Datensätzen mit den gemessenen Bodenwassertemperaturen zugeordnet.

Rasterdaten RaKliDa

Zur anwenderorientierten Bereitstellung GIS-kompatibler Rasterdaten von räumlich interpolierten Zeitreihen gemessener und simulierter Klimatelemente für den Freistaat Sachsen wurde im August 2009 der Datenservice „Rasterklimadaten“ freigeschaltet. Die Anwender-Zielgruppe besteht vor allem aus Forschungseinrichtungen und Behörden, die sich mit den regionalen Auswirkungen des Klimawandels beschäftigen. Die Entwicklung erfolgt an der TU Dresden in Zusammenarbeit mit dem LfULG.

Der Datenservice „Rasterklimadaten“ befand sich zum Zeitpunkt der Bearbeitung der Vorstudie noch im Aufbau. Im Rahmen der Fortführung des Vorhabens besteht die Möglichkeit, für jeden Standort in Sachsen interpolierte Klimadaten in Form von Tages-, Monats- und Jahreswerten anzufordern. Dies betrifft folgende Größen:

- Lufttemperatur (Minimum, Mittelwert, Maximum) [°C]
- relative Luftfeuchte [%]
- Sonnenscheindauer [h]
- Niederschlag unkorrr./korrr. [mm]
- Windgeschwindigkeit 10 m und 2 m über GOK [m/s]
- Windstärke [Bft]
- Globalstrahlung nach Angström [J/cm² und kWh/m²]
- potenzielle Verdunstung nach Wendling [mm]

3.6 Regionalisierung der Klimadaten

An den Messstellen der Wassertemperatur wird nur in Ausnahmefällen, so auf Intensivmessflächen oder an meteorologischen Stationen, die Lufttemperatur gemessen. Zur statistischen Auswertung der gemessenen Wassertemperaturen in Zusammenhang mit der Lufttemperatur und ggf. mit anderen Parametern wie die Globalstrahlung müssen deshalb die gemessenen Lufttemperaturen der meteorologischen Stationen in Sachsen auf die jeweilige Messstelle übertragen bzw. regionalisiert werden. Dies erfolgt i. d. R. durch eine höhenabhängige und abstandsgewichtete Interpolation der Messdaten.

Die Interpolation ist für Tagesreihen nur mit hohem Aufwand durchführbar. Deshalb und aufgrund der großen Anzahl an Messstellen in Fließ- und Standgewässern und Boden- und Grundwasser wurde zur Regionalisierung der Klimadaten im Rahmen der vorliegenden Vorstudie die Fläche des Freistaates Sachsen zunächst in Klimaregionen unterteilt. Für diese Klimaregionen wurden anschließend die meteorologischen Datenreihen 1981-2003 durch Interpolation aus Stationsdaten ermittelt. Somit kann

jeder Messstelle in Sachsen im Zeitraum 1981-2003 die gemessene und interpolierte Lufttemperatur und weiterhin die Daten von Luftfeuchte, Niederschlag, Sonnenscheindauer und Windgeschwindigkeit zugeordnet werden. Aus diesen Daten kann zusätzlich die potenzielle Verdunstung und die klimatische Wasserbilanz in Form von Tageswerten berechnet werden.

Die im Folgenden beschriebene sachsenweite Interpolation der Datenreihen der 21 Stationen kann anhand der ergänzten Klimadaten 1961-1980 und 2004-2009 und anhand der Ergebnisse der WEREX-IV-Projektionsdaten wiederholt werden. Damit ist die erforderliche Basis an Klimadaten zur statistischen Auswertung und Modellierung gegeben. Alternativ kann der Datenservice „Rasterklimadaten“ (RaKliDa) der TU Dresden genutzt werden.

3.6.1 Ausweisung von Klimaregionen

Die geografische Lage prägt das Klima in Mitteleuropa. In erster Linie nimmt die Kontinentalität mit zunehmender Entfernung zum Meer zu. Hieraus resultiert für viele klimatische Zustandsgrößen wie Temperatur, Niederschlagssumme und Luftfeuchte ein etwa von Nordwesten nach Südosten gerichteter Gradient (FLEMMING 2000).

Das Klima wird wesentlich von der Meereshöhe geprägt. So korreliert die Lufttemperatur sehr stark mit der Meereshöhe. Für das Erzgebirge werden Temperaturgradienten von 0.56 K/100 m bis 0.58 K/100 m angegeben (FLEMMING 2000). Im Mittelgebirge nimmt die Luftfeuchte und die Nebelhäufigkeit mit zunehmender Meereshöhe stark zu und die Sonnenscheindauer ab. Aufgrund der Lage und Ausrichtung der Nordabdachung des Erzgebirges resultiert eine Veränderung klimatischer Bedingungen in NNW-SSE-Richtung. Aus der Lage zum Meer und der Streichrichtung des Erzgebirges resultiert für Sachsen ein Hauptklimagradient in Richtung NW-SE mit Tendenz zu NNW-SSE (FLEMMING 2000).

Das dritte klimaprägende Standortmerkmal ist das Relief. Das Relief verursacht Wettererscheinungen wie den Niederungsnebel, Stau- und Föhnneffekte, Kaltluftflüsse und -seen. Letztlich unterscheiden sich die klimatischen Bedingungen von Wäldern, Offenland und Städten. Größere Städte weisen ein ausgeprägtes Stadtklima auf, welches sich vom Klima des Umlandes insbesondere durch höhere Temperaturen unterscheidet.

Die Fläche des Freistaates Sachsen wurde in Teilflächen mit mehr oder weniger homogenen klimatischen Bedingungen untergliedert (Abbildung 17). Dies erfolgte anhand der geografischen Lage (zunehmende Kontinentalität) und der Geländehöhe (Höhengradient). Die geografische Lage wurde berücksichtigt, indem die Landesfläche zunächst entsprechend der Naturräume unterteilt wurde (LFUG 2004). Die klimatischen Bedingungen in den Naturräumen sind dabei bereits relativ homogen.

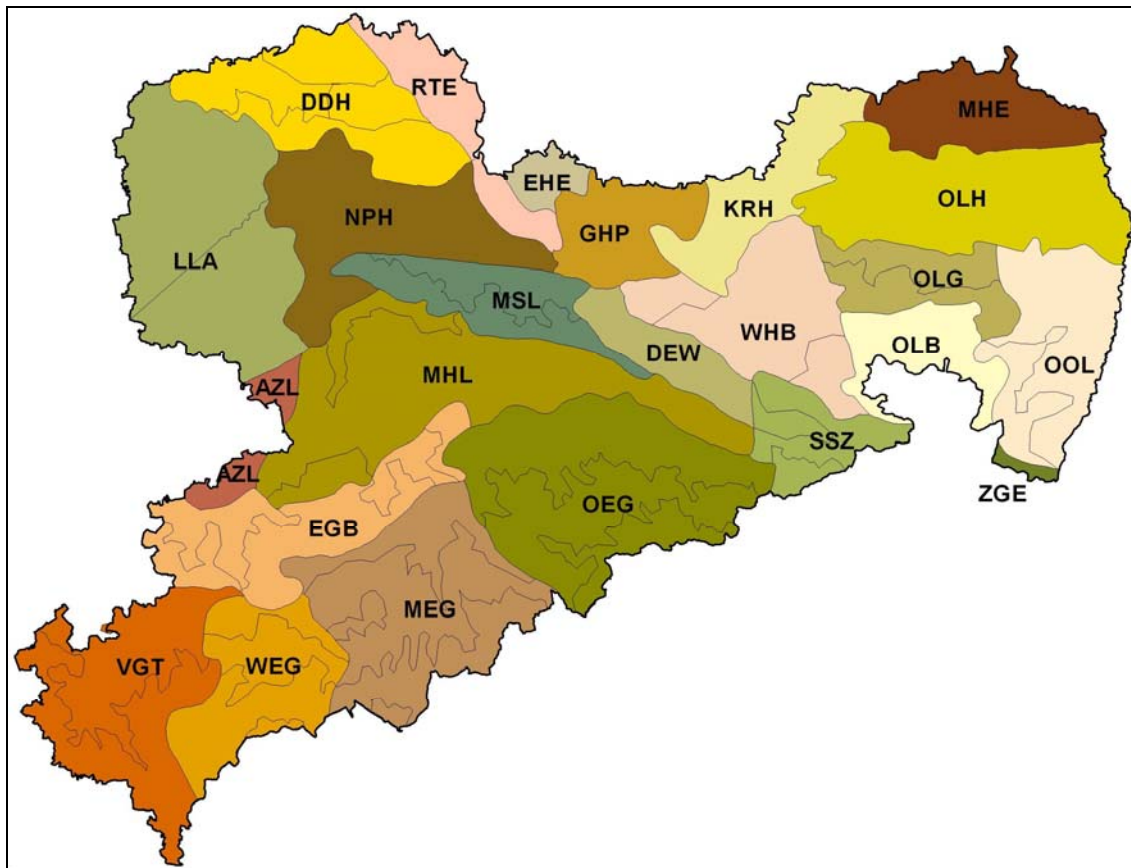


Abbildung 17: Gliederung der Fläche des Freistaates Sachsen in Naturräume

Gemessene Klimadaten standen in Form von Tagesreihen von Lufttemperatur, Luftfeuchte, Sonnenscheindauer, Windgeschwindigkeit (Messhöhe 10 m) und Niederschlag (unkorrigiert) von ca. 20 Wetterstationen zur Verfügung (Abschnitt 3.6.2). Diese Messdaten können nur genutzt werden, wenn die klimatische Situation an der Messstation vergleichbar ist mit der an der jeweiligen Messstelle. Liegt die Messstelle nicht an der meteorologischen Station wie im Fall der Bodenintensivmessflächen, sondern zwischen zwei oder mehreren Wetterstationen, müssen die Tagesreihen dieser Stationen interpoliert werden. Die Vorgehensweise zur Interpolation ist in Abschnitt 3.6.2 beschrieben.

Tabelle 12: Gliederung der Fläche des Freistaates Sachsen in Naturräume

| Code | Naturraum nach LfUG (2004) |
|------|--|
| RTE | Riesa-Torgauer Elbtal |
| DDH | Düben-Dahlener Heide |
| EHE | Elsterwerda-Herzberger Elsterniederung |
| LCB | Luckau-Calauer Becken |
| NGW | Niederlausitzer Grenzwall |
| MHE | Muskauer Heide |
| LLA | Leipziger Land |
| SFB | Senftenberg-Finsterwalder Becken und Platten |
| KRH | Königsbrück-Ruhlander Heiden |
| OLH | Oberlausitzer Heide- und Teichgebiet |

| Code | Naturraum nach LfUG (2004) |
|-------------|--|
| NPH | Nordsächsisches Platten- und Hügelland |
| EHE | Elsterwerda-Herzberger Elsterniederung |
| GHP | Großenhainer Pflege |
| HLH | Hallesches Lösshügelland |
| WHB | Westlausitzer Hügel- und Bergland |
| OLG | Oberlausitzer Gefilde |
| OOL | Östliche Oberlausitz |
| MSL | Mittelsächsisches Lösshügelland |
| WLH | Weißenfelser Lösshügelland |
| DEW | Dresdner Elbtalweitung |
| MLH | Mulde-Lösshügelland |
| OLB | Oberlausitzer Bergland |
| AZL | Altenburger-Zeitzer-Lösshügelland |
| SSZ | Sächsische Schweiz |
| OEG | Osterzgebirge |
| EGB | Erzgebirgsbecken |
| ZGE | Zittauer Gebirge |
| AZL | Altenburger-Zeitzer-Lösshügelland |
| MEG | Mittelerzgebirge |
| VGT | Vogtland |
| VGT | Vogtland |
| VGT | Vogtland |
| WEG | Westerzgebirge |

Eine weitere Unterteilung der Landesfläche erfolgte anhand der Geländehöhe. Die Unterteilung der Fläche des Freistaates in folgende Höhenzonen wurde progressiv vorgenommen, um eine kleinflächige Zergliederung der höheren Mittelgebirgslagen im Unterschied zum Flachland zu vermeiden (Abbildung 18): 70 ... 100 m HN; 100 ... 200 m HN; 200 ... 320 m HN; 320 ... 470 m HN; 470 ... 650 m HN; 650 ... 900 m HN und > 900 m HN

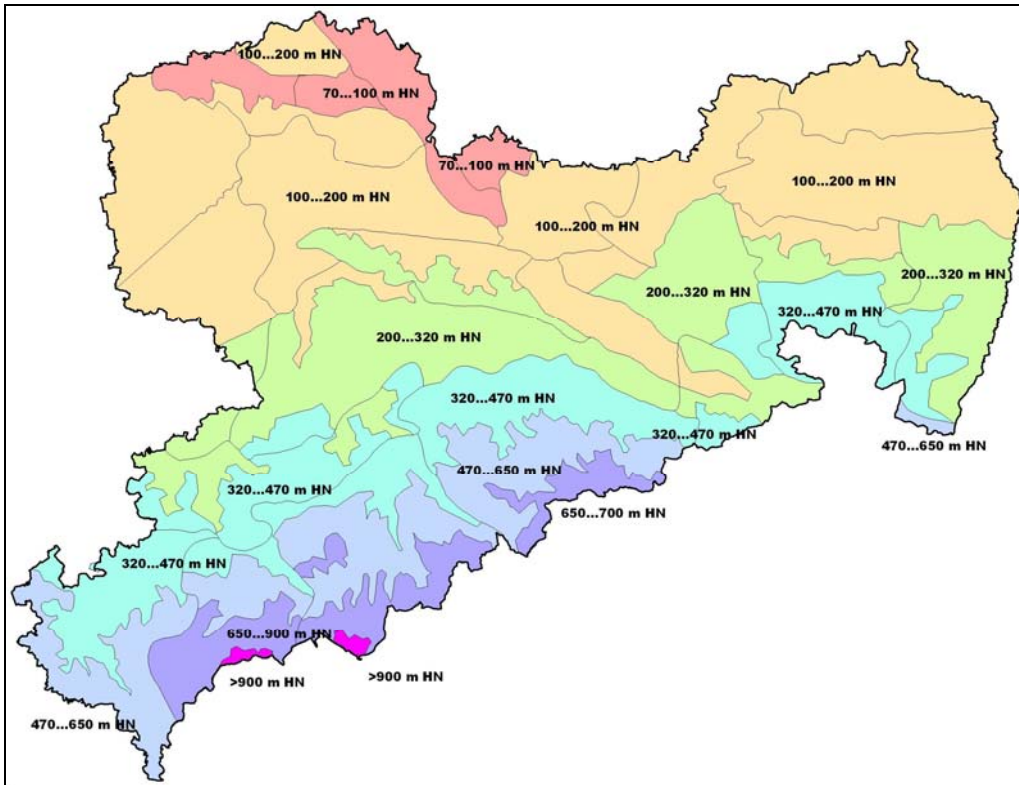


Abbildung 18: Gliederung der Fläche des Freistaates Sachsen in Höhenzonen

Zur besseren Berücksichtigung der geografischen Lage wurden die flächenmäßig weit ausgedehnten Naturräume Leipziger Land (LLA) und Mittelsächsisches Lösshügelland (MSL) in eine nordwestliche und eine südöstliche Teilfläche unterteilt (Abbildung 19).

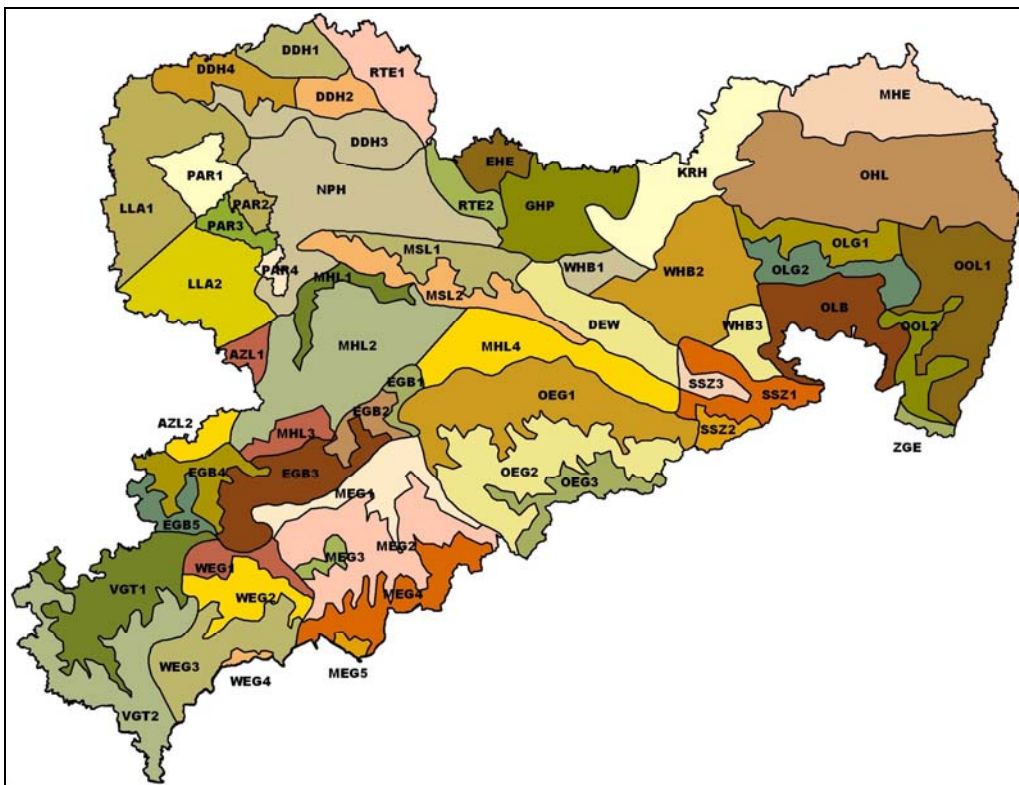


Abbildung 19: Einteilung der Landesfläche in Klimaregionen für die Zuweisung meteorologischer Datenreihen

Durch Verschnitt der Naturräume mit den Höhenzonen entstehen insgesamt 54 Teilflächen, für die angenommen werden kann, dass die klimatischen Bedingungen innerhalb der Teilfläche räumlich weitgehend homogen verteilt sind. Dabei handelt es sich nicht um Klimaregionen (Regionen mit definierten klimatischen Bedingungen), weil keine Berücksichtigung der zu deren Charakterisierung erforderlichen kleinräumigen Unterschiede in Relief, Bewuchs oder Landnutzung bei der Unterteilung der Fläche erfolgte.

Das Einzugsgebiet der Parthe liegt im Bereich der Klimaregionen LLA1, LLA2 und NPH. Für detaillierte Betrachtungen wurde es entsprechend seiner Teileinzugsgebiete, der NW-SE-Gradienten, der Verbreitung der Naturräume Leipziger Land und Nordsächsisches Platten- und Hügelland und der Höhenlage in vier Teilgebiete untergliedert (Abbildung 20):

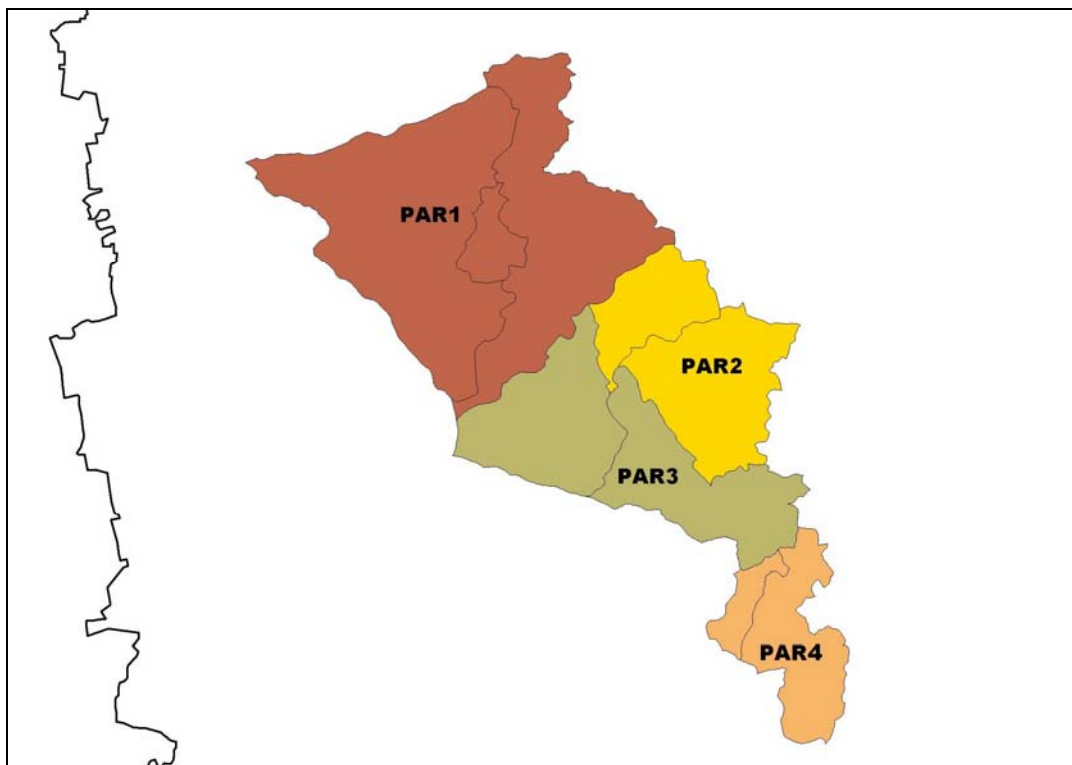


Abbildung 20: Einteilung des Einzugsgebietes der Parthe in Teilgebiete

Tabelle 13: Einteilung des Einzugsgebietes der Parthe in Teilgebiete

| Teilgebiet | Höhenlage | Naturraum |
|------------|----------------------|--|
| PAR1 | geringe Geländehöhe | vorw. Leipziger Land |
| PAR2 | mittlere Geländehöhe | vorw. Nordsächsisches Platten- und Hügelland |
| PAR3 | mittlere Geländehöhe | vorw. Leipziger Land |
| PAR4 | höhere Geländehöhe | vorw. Nordsächsisches Platten- und Hügelland |

3.6.2 Interpolation der Klimadaten

Zur Interpolation der Klimadaten wurde für die Fläche des Freistaates Sachsen ein Gitternetz im Raster 1.000 m x 1.000 m erstellt. Für jeden Gitterpunkt können die meteorologischen Daten durch Interpolation der Stationsdaten berechnet werden. Dabei wird die Geländehöhe aus einem digitalen Höhenmodell berücksichtigt. Anschließend kann ein Mittelwert für alle Gitterpunkte der einzelnen Klimaregionen berechnet werden und dieser Mittelwert als Tageswert allen Messstellen in den Klimaregionen zugeordnet werden.

Die Interpolation wurde mit dem Bestandteil „REGRESS“ des Einzugsgebietsmodells WaSiM-ETH durchgeführt. Dieses Modul berechnet zunächst anhand der Werte aller Stationen den Höhengradient und die horizontalen W-E- und N-S-Gradienten der meteorologischen Größe im betreffenden Zeitraum (Monate, Quartale, Halbjahre, Jahre). Die Interpolation der Daten für einen konkreten Gitterpunkt erfolgt höhenabhängig anhand der konkreten Geländehöhe, lageabhängig anhand der konkreten Koordinaten und zusätzlich anhand der Werte der jeweils nächstgelegenen Stationen (abstandsgewichtete Interpolation).

Das Ergebnis der Regionalisierung ist exemplarisch anhand der mittleren Lufttemperatur der Klimaregionen in Abbildung 21 dargestellt. Die Darstellung der Jahresmitteltemperatur für die Klimaregionen verdeutlicht die Höhenabhängigkeit der Temperatur und den allgemeinen NW-SE-Klimagradienten in Sachsen mit Tendenz zu NNW-SSE.

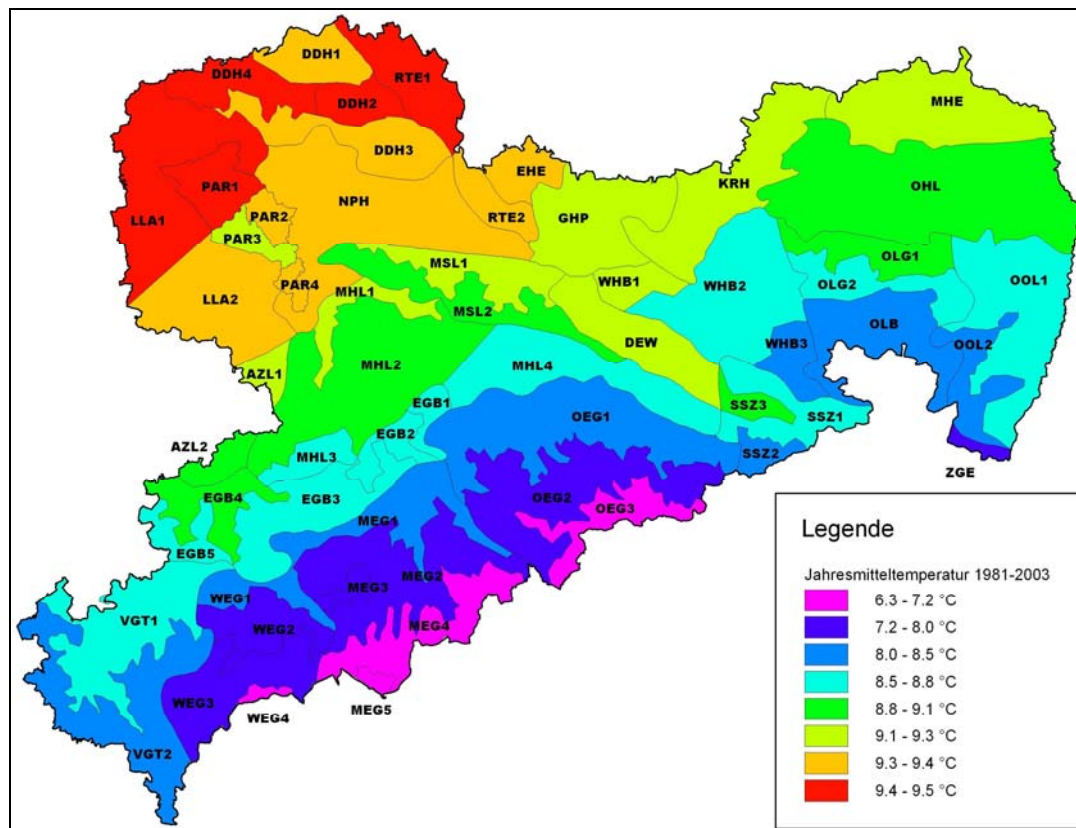


Abbildung 21: Exemplarische Darstellung der interpolierten Lufttemperatur als Jahresmittel für die Klimaregionen

3.6.3 Aufnahme der Klimadaten in die Datenbank

Ungeachtet dessen, ob am Standort einzelner Messstellen der Wassertemperatur wie auf den Intensivmessflächen des Agrar-meteorologischen Messnetzes auch Wetterdaten gemessen werden, wurden die interpolierten Klimadaten (Lufttemperatur, Luftfeuchte, Niederschlag, Sonnenscheindauer und Windgeschwindigkeit) der Klimaregionen den einzelnen Datensätzen in der Projektdatenbank zugeordnet. Damit ist eine statistische Auswertung der Wassertemperaturen in Abhängigkeit von der Lufttemperatur oder der anderen Klimadaten möglich. Es wurden die gemessenen und interpolierten Clisax-Daten des Zeitraumes 1981-2003 zugeordnet.

Mit dem Vergleich der Wassertemperatur mit der am selben Tag gemessenen mittleren Lufttemperatur können die Vorbedingungen nicht berücksichtigt werden, die für die Wassertemperatur von wesentlicher Bedeutung sind. Aus diesem Grunde wurden Temperatursummen berechnet, welche von der Lufttemperatur unterschiedlich langer zurückliegender Zeiträume bestimmt werden (Tabelle 14):

Tabelle 14: Zeiträume für die Berechnung der Temperatursummen

| Datenbankfeld | Erläuterung |
|---------------|--|
| T?007 | es wird die Temperatur des aktuellen Tages und der sechs zurückliegenden Tage berücksichtigt |
| T?015 | es wird die Temperatur des aktuellen Tages und der 14 zurückliegenden Tage berücksichtigt |
| T?030 | es wird die Temperatur des aktuellen Tages und der 29 zurückliegenden Tage berücksichtigt |
| T?060 | es wird die Temperatur des aktuellen Tages und der 59 zurückliegenden Tage berücksichtigt |
| T?090 | es wird die Temperatur des aktuellen Tages und der 89 zurückliegenden Tage berücksichtigt |
| T?180 | es wird die Temperatur des aktuellen Tages und der 179 zurückliegenden Tage berücksichtigt |
| T?365 | es wird die Temperatur des aktuellen Tages und der 364 zurückliegenden Tage berücksichtigt |

Weil die Lufttemperatur weit zurückliegender Zeiträume einen geringeren Einfluss auf die Wassertemperatur hat als die Lufttemperatur am Messtag selbst und der unmittelbar vorangegangenen Tage, wurden die Lufttemperaturen zur Berechnung der Temperatursummen unterschiedlich gewichtet. Hier wurden zwei Ansätze gewählt (Abbildung 22):

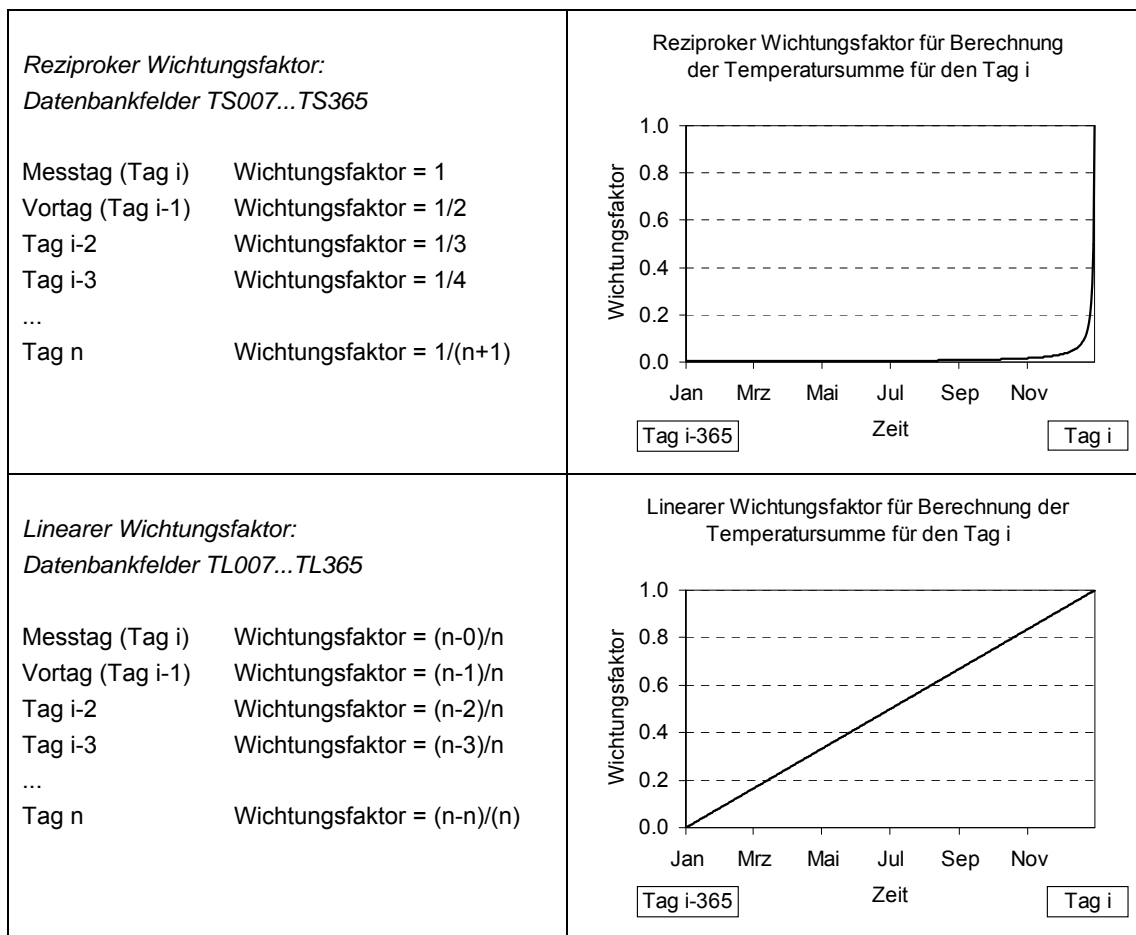


Abbildung 22: Wichtungsfaktoren zur Berechnung der Temperatursumme des zurückliegenden Zeitraums

Aus den Temperatursummen wurden anschließend gleitende Mittelwerte berechnet. Diese wurden in die Projektdatenbank integriert. Dabei zeigte sich, dass die Berechnungen mit linearem Wichtungsfaktor die gemessenen Wassertemperaturen besser nachbilden, weil der weiter zurückliegende Zeitraum mit reziprokem Ansatz zu schwach gewichtet wird (Abbildung 23 und Abbildung 24).

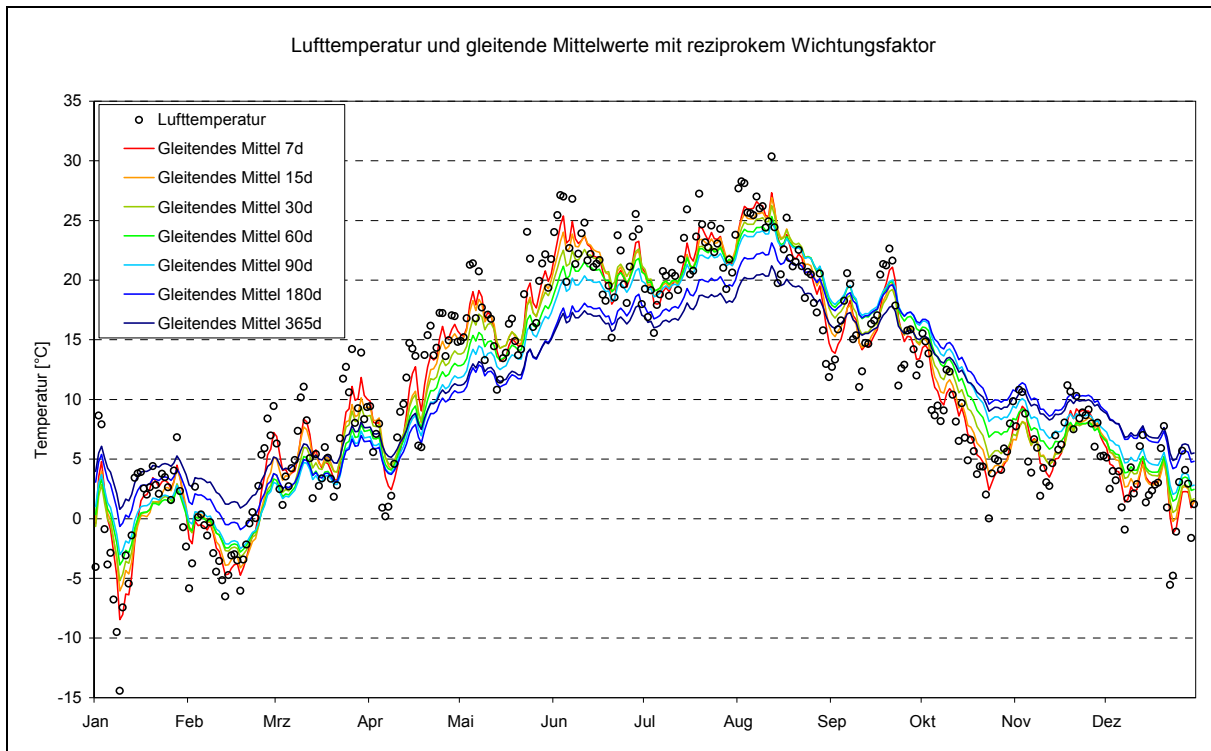


Abbildung 23: Darstellung der gleitenden Mittelwerte der Lufttemperatur mit reziprokem Wichtungsfaktor

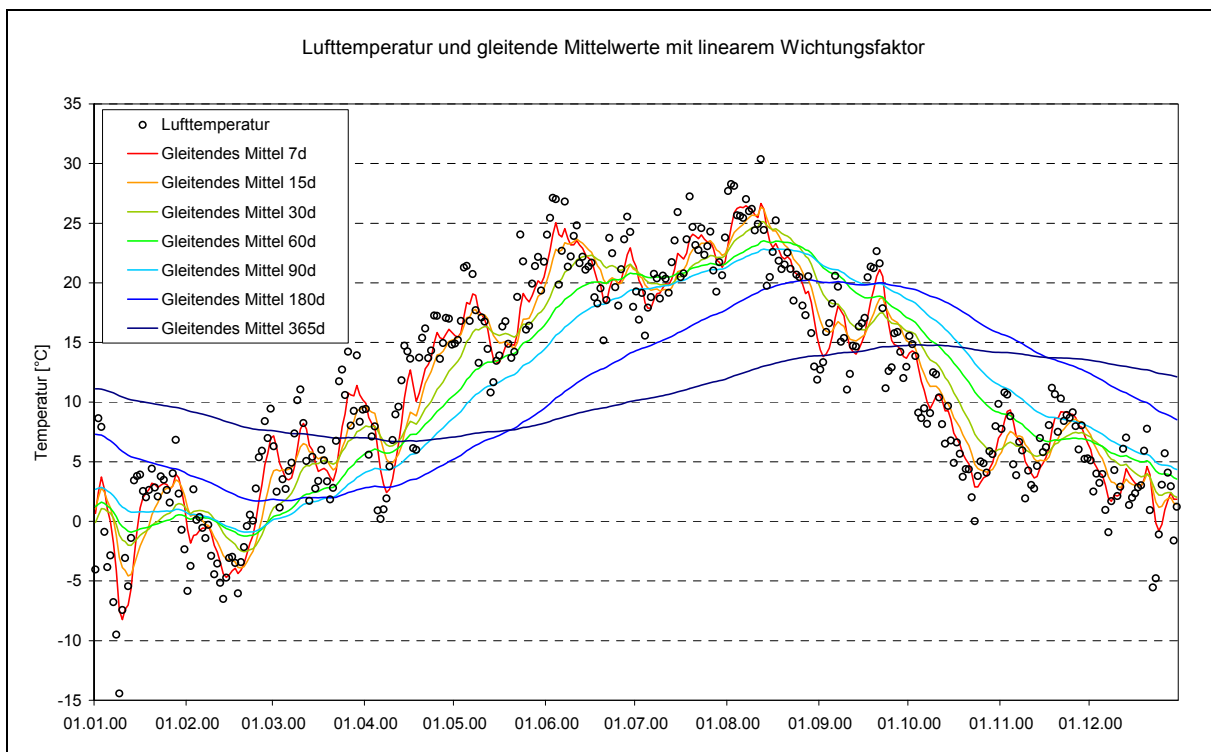


Abbildung 24: Darstellung der gleitenden Mittelwerte der Lufttemperatur mit linearem Wichtungsfaktor

Bei der Arbeit mit der Datenbank ist zu berücksichtigen, dass auf einigen Messflächen auch die meteorologischen Daten gemessen wurden. Diese sollten besser für die Auswertung geeignet sein als die interpolierten Daten. Sie wurden in den meisten Fällen bereits in die Datenbank aufgenommen. Der Vergleich der am Standort gemessenen Wetterdaten mit den interpolierten Clisax-Daten ermöglicht eine Bewertung der Güte der Interpolation.

3.7 Datenpaket KliWEP Parthe

Vorhaben KliWEP - Abschätzung der Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt im Parthe-Einzugsgebiet

Das Vorhaben KliWEP gliedert sich in mehrere Abschnitte. In einem ersten Abschnitt wurde das unterirdische Einzugsgebiet der Parthe mit dem Einzugsgebietsmodell WaSiM-ETH nachgebildet. Es erfolgte der Modellaufbau, die Zuweisung der Eingangsdaten, eine Prognose der Entwicklung der Flächennutzung im Klimawandel, eine Modellkalibrierung anhand der Daten der Lysimeterstation Brandis und von gemessenen Durchflüssen in der Parthe und deren Teileinzugsgebiet Schnellbach. Anschließend wurden Modellrechnungen mit einfacher Kopplung von WaSiM-ETH mit dem Grundwassermodell PCGEOFIM durchgeführt.

In einem weiteren Projektabschnitt wurde die Datengrundlage für den Modellinput aktualisiert und verbessert. Dies betrifft u. a. eine aktuelle Vermessung der Parthe, die Verbesserung des digitalen Geländemodells oder die Übernahme von Randbedingungen aus dem Großraummodell HGMS.

Im dritten Projektabschnitt wurde untersucht, inwieweit das bisher rein hydrologische Konzept der Modellkopplung um Aspekte des Stoffhaushaltes erweitert werden könnte. Betrachtet wurde die C- und N-Dynamik. Hierzu wurde eine Recherche zu Kenntnisstand und geeigneten Modellen durchgeführt und ein Vorschlag zur Erweiterung des KliWEP-Modellverbundes erarbeitet. Anschließend wurde eine Kosten-Nutzen-Analyse zur Realisierung durchgeführt.

Der Gegenstand des vierten Projektabschnittes bestand in der Erweiterung von WaSiM-ETH um prozessorientierte Komponenten zur besseren Berücksichtigung komplexer Vegetationsstrukturen oder differenzierter Bodeneigenschaften (explizite Zeitschrittsteuerung für das Bodenmodul auf Grundlage der Richards-Gleichung). Das Modell wurde erweitert und getestet. Weiterhin wurde die Modellkopplung auf Tagesschrittweite realisiert und für das EZG des Schnellbachs angewandt. Im fünften Projektabschnitt wurde die Berücksichtigung der Phänologie und deren Beeinflussung durch die Frühjahrstrockenheit in WaSiM-ETH verbessert.

Datenpaket KliWEP Parthe

Das Datenpaket beinhaltet die Messdaten zur Ableitung des Modellinputs, zur Modellkalibrierung und die Modellergebnisse. Letztere sind hinsichtlich der Datenmenge sehr umfangreich und wurden im Rahmen der Vorstudie nicht ausgewertet. Sie können im Rahmen einer weiterführenden Studie dazu dienen, z. B. klimatisch bedingte Veränderungen der Durchflüsse oder Wasserstände abzuleiten.

Folgende Daten sind in dem Datenpaket KliWEP Parthe enthalten:

Tabelle 15: Auszug aus dem Datenpaket KliWEP Parthe

| Ordner | Unterordner | Unterordner/ Name | Datenart | Beschreibung |
|------------|------------------------|---------------------------------------|------------------|---|
| Hydrologie | Grundwassermessstellen | | Tabellen | Messwerte der Stichtagsmessungen 1999-2004 (Wasserstände) |
| | Kläranlagen | 2007-08-08 Liste Monatsdurchfluss.xls | Tabelle | Kläranlagen Panitzsch, Borsdorf |
| | | KA_Zuleitung.txt | | Aufbereitete Zuleitungen in die Parthe aus den Kläranlagen Panitzsch, Borsdorf, Naunhof |
| | | RP Leipzig | zwei Worddateien | Abwassereinleitungen in die Parthe und unmittelbare Nebenflüsse im Bereich des Regierungspräsidiums Leipzig |
| | Pegel | Albrechtshain | Textdateien | Originaldaten (Wasserstände, Durchflüsse) |
| | | Leipzig | Textdateien | Originaldaten (Wasserstände, Durchflüsse) |

| Ordner | Unterordner | Unterordner/ Name | Datenart | Beschreibung |
|------------|---------------------------------|---|--------------------------|--|
| | | Stundenwerte | Tabelle | Stundenwerte für den Pegel Leipzig-Thekla (August 2002) |
| | | OW_Pegel TW ab 1980.xls | Tabelle | Durchflusswerte für die Pegel Leipzig-Thekla, Naunhof, Pomßen, Großsteinberg, Großbardau, Glasten und Albrechtshain |
| | | Durchfluss-Parthe.xls | Tabelle | Durchflusswerte für die Pegel Leipzig-Thekla, Naunhof, Pomßen, Großsteinberg, Großbardau, Glasten und Albrechtshain, aufbereitet |
| | unterirdisches Einzugsgebiet | eg-grenze | shape-Datei | Quelle: IBGW |
| | Wasserwerke Naunhof | Wasserentnahmen | Tabelle | Wasserentnahmen |
| | | Wasserschutzgebiet | shp-Dateien | Schutzgebietsgrenzen |
| | Wasserwerk Beucha-Brandis | WW Beucha-Brandis.rtf | Word-Datei | Wasserwerksdatei: Förderung, Netzabgabe, Eigenverbrauch (2004-2006) |
| Klima | kliwep1 | | Textdateien | Eingangsdaten aus dem Projekt Kliwep1 (Luftfeucht, Lufttemperatur, Sonnenscheindauer, Niederschlag, Windgeschwindigkeit) für die Stationen: Ammelshain, Ballendorf, Beiersdorf, Bernbruch, Brandis, Grethen, Großbardau, Großsteinberg, Jesewitz, Rohrbach, Sermuth, Threna, Glasten, Naunhof (1980-2000: Messdaten, 2000-2050 Szenariendaten) |
| | kliwep2 | | Textdateien | Eingangsdaten aus dem Projekt Kliwep2 (Luftfeuchte, Lufttemperatur, Sonnenscheindauer, Niederschlag, Windgeschwindigkeit, Globalstrahlung) für die Stationen: Ammelshain, Ballendorf, Beiersdorf, Bernbruch, Brandis, Grethen, Großbardau, Großsteinberg, Jesewitz, Rohrbach, Sermuth, Threna, Glasten, Naunhof (1980-2004, Messdaten) |
| | L-Schkeuditz_ bis2000 | | Tabellen | Daten der Klimastation Leipzig bis 2000 (Luftfeuchte, Lufttemperatur, Niederschlag, Windgeschwindigkeit, Globalstrahlung, potentielle Evapotranspiration) |
| | Modellierung_ aktuell | | Tabellen und Textdateien | Für die Modellierung bis 2100 aufbereitete meteorologische Daten (Lufttemperatur, Niederschlag, Windgeschwindigkeit, Sonnenscheindauer, rel. Luftfeuchte), Messdaten 1980-2006, WEREX IV-Daten bis 2100 für die Szenarien B1, A2 und A1B jeweils in der trockenen und feuchten Realisation |
| | Stundenwerte Brandis | Stundenwerte Brandis August 2002.xls | Tabelle | August 2002 |
| | Niederschlag.xls | | Tabelle | Originaldaten: gemessene Niederschläge im Untersuchungsgebiet |
| | WEREX | | pdf-Dateien | Hinweise für Datennutzer |
| Topografie | dgm | dgm_bi07 | Rasterdatensatz | digitale Geländemodell im 20-m-Raster des Einzugsgebietes |

3.8 Wehrdatenbank

Die Wehrdatenbank des LfULG liefert Informationen über Querbauwerke in den Fließgewässern und deren Gewässernutzungen wie Energieerzeugung durch Wasserkraftanlagen oder Brauchwasserentnahmen. Wasserkraftanlagen mit Ausleitungsstrecken entnehmen dem Gewässer den Hauptteil des Freiwassers und leiten dieses über einen Obergraben um. Nach der Kraftwerkspassage wird das umgeleitete Wasser wieder in das Gewässer eingeleitet. Insgesamt wird der Durchfluss im verbleibenden Gewässer über die genutzte Strecke bis zu einem in der Regel behördlich festgelegten Mindestwasserabfluss reduziert. Dabei und aufgrund des geringen Längsgefälles des Obergrabens wird die Fließgeschwindigkeit vermindert. Weiterhin vergrößert der Obergraben die Freiwasserfläche bei gleicher Wassermenge. Letztlich befindet sich im verbleibenden Gewässer eine geringere Wassermenge, deren Temperatur schneller auf atmosphärische Bedingungen reagiert.

In der Abbildung 25 ist die Lage aller in der Wehr-Datenbank enthaltenen Wehre und Stauanlagen dargestellt. Die Abbildung verdeutlicht, dass sich die meisten Wehre zur Wasserkraftnutzung in den Oberläufen befinden. Dies liegt einerseits in der höheren Reliefenergie des Mittelgebirges begründet, andererseits zum Teil auch in der lange zurückliegenden Zeit der Errichtung der Anlagen, in der größere Flüsse technisch noch nicht beherrschbar waren. Weiterhin werden die meisten der dargestellten Wehre nicht mehr zur Wasserentnahme genutzt, weil eine Vielzahl von Anlagen stillgelegt wurde. Damit reduziert sich die Anzahl der derzeit für die Wassertemperatur relevanten größeren Wehranlagen. Anhand der Datenbank sollten diejenigen Messstellen in Fließgewässern identifiziert werden, welche sich im Gewässer zwischen einer aktiven Wasserentnahme und der Wiedereinleitung befinden, um anthropogene Beeinflussungen auszuschließen.

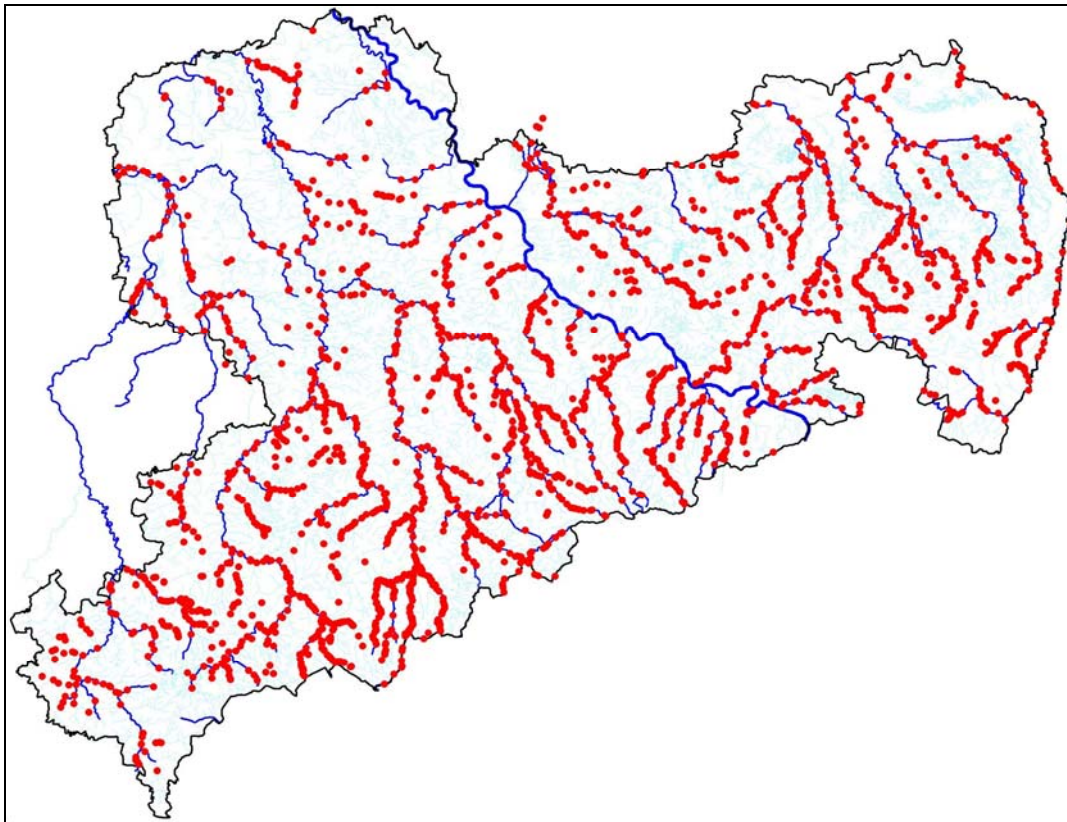


Abbildung 25: Lage der Stauanlagen in Sachsen (Datenquelle: Wehrdatenbank)

3.9 Datenbank Einleiter

Einleitungen können ebenfalls die Wassertemperatur eines Fließgewässers beeinflussen. Bei den relevanten industriellen Einleitern handelt es sich um 50 Betriebe, die Ab-/Brauchwasser in einer Menge von $>1.000\text{ m}^3/\text{a}$ in die Vorflut abgeben (Abbildung 26). Die Temperatur des eingeleiteten Wassers liegt zwischen $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $38\text{ }^{\circ}\text{C}$. In Abhängigkeit vom mittleren Durchfluss unter Berücksichtigung des mittleren Niedrigwasserabflusses der Vorfluter an der Einleitestelle, welche anhand von Pegel­daten ermittelt werden können, kann die Beeinflussung der Gewässertemperatur abgeschätzt werden. Damit können Messstellen mit anthropogener Beeinflussung der Gewässertemperatur bzw. Einzugsgebiete, die nicht als Modellgebiet in Frage kommen, identifiziert werden.



Abbildung 26: Industrielle Einleiter

Ebenso wie die Standorte der industriellen Einleiter ist die Lage der Einleitstellen der kommunalen Kläranlagen in die Vorflut bekannt (Abbildung 27). Anhand der in der Datenbank enthaltenen Einwohnergleichwerte (bis zu 740.000 EW, Stadt Dresden) kann die Einleitmenge abgeschätzt werden. Damit ist ebenfalls eine Bestimmung von Messstellen mit anthropogen beeinflusster Temperatur möglich.

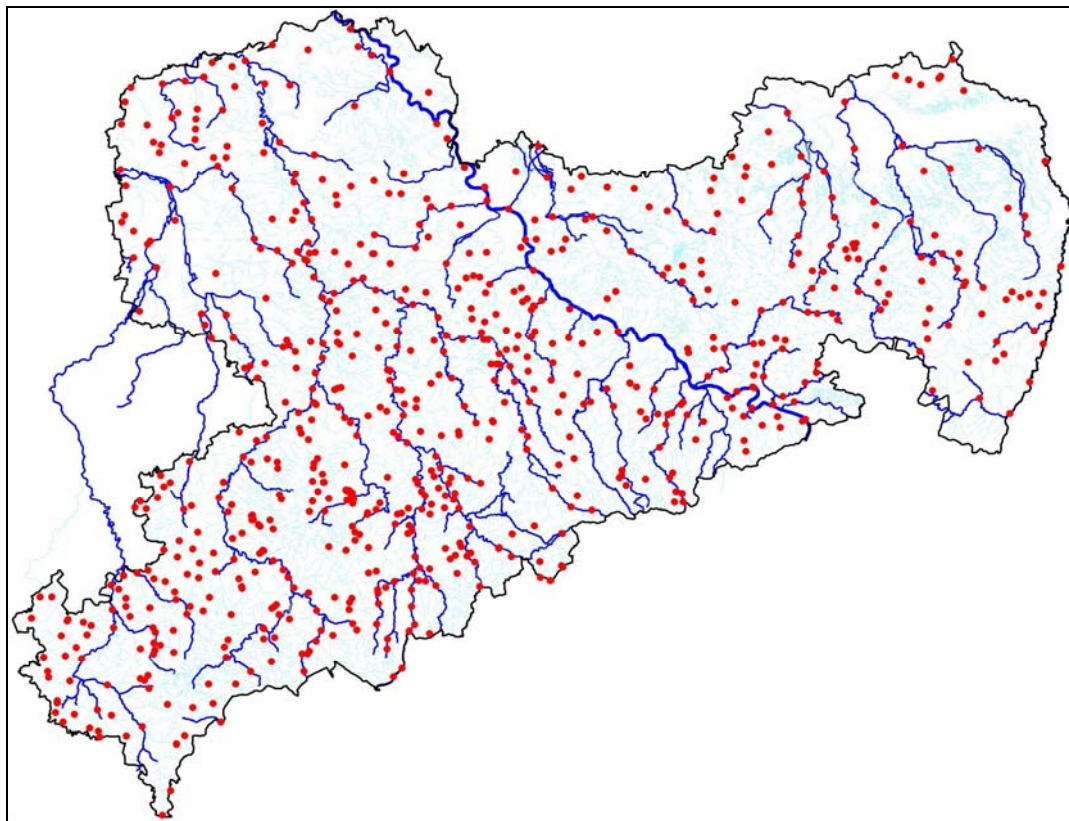


Abbildung 27: Einleitstellen kommunaler Kläranlagen

3.10 Kraftwerke

Zusätzlich zu den Wehr- und Einleiterdatenbanken, die den derzeitigen Zustand repräsentieren, wurde eine Recherche zu Kraftwerken durchgeführt, welche der Energie- und Fernwärmeerzeugung dienen oder in der Vergangenheit in Betrieb waren.

Die nachfolgenden Listen der recherchierten existierenden Kraftwerke (Tabelle 16 bis Tabelle 18) erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Nicht aufgeführt ist das Pumpspeicherwerk Markersbach im Westerzgebirge.

Tabelle 16: Existierende Wärmekraftwerke mit mind. 100 MW Leistung

| KW-Name | Betreiber | Land | Betreiberstandort | Elektr. Bruttoleistung | Fernwärmeleistung | Inbetriebnahme (Ertüchtigung) | Anlagenart | Primärenergie |
|------------------------------------|----------------------|------|-------------------|------------------------|-------------------|-------------------------------|------------|-------------------|
| Braunkohlekraftwerk Boxberg | | | | | | | | |
| Boxberg N | Vattenfall Europe AG | SN | Boxberg | 500.0 | 30.0 | 1979 (1993) | DKW | Braunkohle |
| Boxberg P | Vattenfall Europe AG | SN | Boxberg | 500.0 | 30.0 | 1980 (1994) | DKW | Braunkohle |
| Boxberg Q | Vattenfall Europe AG | SN | Boxberg | 907.0 | 65.0 | 2000 | DKW | Braunkohle |
| Heizkraftwerk Chemnitz Nord | | | | | | | | |
| Chemnitz Nord II | StW Chemnitz | SN | Chemnitz | 185.0 | 475.0 | 1986 | HWK | Braunkohle/Gas/Öl |

| KW-Name | Betreiber | Land | Betreiberstandort | Elektr. Bruttoleistung | Fernwärmeleistung | Inbetriebnahme (Ertüchtigung) | Anlagenart | Primärenergie |
|--|-----------------------------|------|-------------------|------------------------|-------------------|-------------------------------|---------------------------|---------------|
| Gas- u. Dampfturbinenkraftwerk Dresden Nossener Brücke | | | | | | | | |
| Dresden Nossener Brücke | DREWAG | SN | Dresden | 270.0 | 480.0 | 1995 | GuD | Erdgas |
| Gas- u. Dampfturbinenkraftwerk Leipzig Nord | | | | | | | | |
| Leipzig-Nord | StW Leipzig | SN | Leipzig | 172.0 | 200 | 1996 | GuD | Erdgas |
| DKW Lippendorf | | | | | | | | |
| Lippendorf R | Vattenfall Europe AG | SN | Böhlen | 920.0 | 230.0 | 2000 | DKW | Braunkohle |
| Lippendorf S | Vattenfall Europe AG / EnBW | SN | Böhlen | 920.0 | 230.0 | 2000 | DKW | Braunkohle |
| KW Außerhalb SN | | | | | | | | |
| Kraftwerk Gera Nord | Kraftwerke Gera GmbH | TH | Gera | 78 | 140 | | Kraft-Wärme-Kopplung, GuD | Gas/Öl |
| Kraftwerk Schwarze Pumpe | Vattenfall Europe AG | BR | Spremberg | 1600 | | | | Braunkohle |
| KW Deuben | MIBRAG | SA | Deuben | | | | | Braunkohle |
| KW Mumsdorf | MIBRAG | TH | Mumsdorf | | | | | Braunkohle |
| KW Wähligt | MIBRAG | SA | Wähligt | | | | | Braunkohle |

Die größeren Biomassekraftwerke sind in Tabelle 17 enthalten.

Tabelle 17: Biomassekraftwerke

| KW-Name | Leistung in MW | Standort | Bemerkungen | Betreiber |
|---------------------------------|-----------------------|-----------|---|---------------------------------|
| Biomassekraftwerk Delitzsch | | Delitzsch | ehemalige Zuckerfabrik | BKD Biokraftwerk Delitzsch GmbH |
| Biomasseheizkraftwerk Sellessen | 2.8 el. 3.5 therm. | Spremberg | Befuerung mit ca. 3,5t Holzhackschnitzel pro Stunde | Vattenfall Europe AG |

Die Standorte größerer Kraftwerke, die derzeit nicht mehr betrieben werden, sind in Tabelle 18 enthalten.

Tabelle 18: Ehemalige Kraftwerke in Sachsen und angrenzenden Gebieten

| KW-Name | Leistung in MW | Standort | Bemerkungen und Betriebszeit | Betreiber |
|----------------------------------|--------------------|--|---|---|
| Braunkohle | | | | |
| Elektrizitätswerk Niederlößnitz | 0.34 | Wahnsdorf, heute Radebeul (Lößnitzgrund) | 1895-1928 und 1945-1962. 1896: 2x 250 PS Dampfmaschinen | Elektrizitätswerk Niederlößnitz (Gemeindeverband), ab 1920 Elektrizitätsverband Gröba |
| Kraftwerk Lauta | 12.5 | Lauta | 1917-1990, erbaut zur Energieversorgung des „Lautawerks“ (Aluminiumhütte) | Vereinigte Aluminium-Werke A.G. (VAW), dann Mitteldeutsche Kraftwerk A.G., seit 1919: Elektrowerke A.G. (EWAG) |
| Kraftwerk Trattendorf (Altwerk) | 160.5 | Spremberg-Trattendorf | 1918-1945 (Demontage als Reparation) | Niederlausitzer Kraftwerke A.G., seit 1919: Elektrowerke A.G. (EWAG) |
| Kraftwerk Trattendorf Werk I/III | 450 | Spremberg-Trattendorf | 1954-1996 | LAUBAG |
| Kraftwerk Plessa | 54 | Plessa | 1927-1992, 1946 Demontage von Turbine 4 (20 MW) als Reparationsleistung | Elektrizitätsverband Gröba/Elster |
| Kraftwerk Espenhain | 450 | Espenhain | 1942-1990/1996 | A.G. Sächsische Werke, seit 1940: A.G. für Kraftstoff- Anlagen (AKA), nach 1945 Deutsch-Sowjetische A.G. Sächsische Werke |
| Kraftwerk Hagenwerder | 1500 | Görlitz-Hagenwerder | 1958-1997, 4 x 75, 2 x 100, 2 x 500 | VEAG, heute Vattenfall Europe |
| Altkraftwerk Lippendorf | 600 el. 550 th. | Neukieritzsch-Lippendorf | 1968–2000, 4 x 100 + 4 x 50 | VEAG, heute Vattenfall Europe |
| Kraftwerk Thierbach | 840 | Kitzscher-Thierbach | 1969-1999, 4 x 210 | VEAG, heute Vattenfall Europe |
| Kraftwerk Hirschfelde | 330 | Zittau-Hirschfelde | 1911-1992 | VEAG |
| Kernkraft | | | | |
| Forschungsreaktor Rossendorf | 10 | Dresden-Rossendorf | 1957-1991 | Zentralinstitut für Kernforschung (ZfK) |

Messstellen, die sich in der Vorflut im Abstrom von Standorten betriebener Kraftwerke befinden, sollten auf anthropogene Temperaturbeeinflussung hin geprüft werden oder nicht zur Auswertung kommen.

Die Lage ehemaliger und bestehender Kraftwerke ist in Abbildung 28 dargestellt.

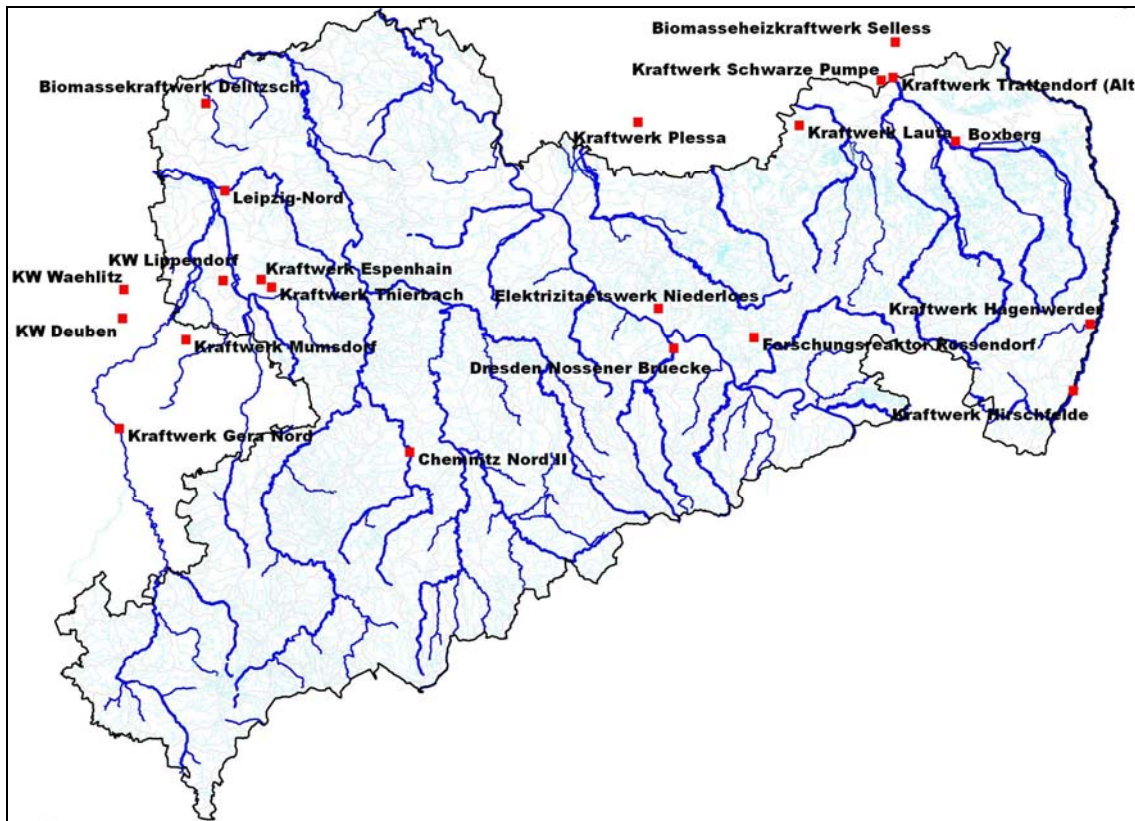


Abbildung 28: Recherchierte Lage ehemaliger und bestehender Kraftwerke

3.11 Vorschlag eines Untersuchungs-/Modellgebietes

Aufgrund der umfangreichen Voruntersuchungen im Rahmen des KliWEP-Projektes und weiterer Untersuchungen von Hydrologie und Gewässerbeschaffenheit bietet sich das Einzugsgebiet (EZG) der Parthe als Untersuchungs-/Modellgebiet zur weiteren Arbeit im Rahmen des Vorhabens an.

Die Parthe gehört mit einer Fließlänge von 58.0 km zu den größeren Fließgewässern in Nordwestsachsen (STAATLICHES UMWELTFACHAMT LEIPZIG 1998). Im Unterlauf wurden im Zuge der Stadtentwicklung Leipzigs bereits in den vergangenen Jahrhunderten wasserbauliche Eingriffe durchgeführt. Nachteilig wirkt sich die teilweise starke anthropogene Beeinflussung vor allem des nordwestlichen und zentralen Teils des Einzugsgebietes aus. Diese geht vor allem von den kommunalen Abwässern aus den Anliegerorten, insbesondere der Städte Naunhof und Taucha aus (STAATLICHES UMWELTFACHAMT LEIPZIG 1998). Die genannten Städte liegen im zentralen (Naunhof) und nördlichen (Taucha) Bereich des Einzugsgebietes. In Naunhof verunreinigten vor 1990 die industriellen Abwässer einer Baumwollspinnerei und der Pelzindustrie den Fluss. Seit 1993 gelangen die Abwässer der Pelzindustrie nicht mehr in das Fließgewässer, zuvor musste bereits die Baumwollspinnerei ihre Produktion einstellen (STAATLICHES UMWELTFACHAMT LEIPZIG 1998). Der äußerste Süden des Einzugsgebietes von der Quelle im Glastener Forst bis zur Einmündung des Schnellbaches und das Einzugsgebiet des Schnellbaches sind abgesehen von der Einleitung kommunaler Abwässer wenig anthropogen beeinflusst.

Im Gegensatz zum Flussgebiet der Pleiße wurde die Wasserführung der Parthe nur in Ausnahmefällen durch die Muldenwasserüberleitung aufgehört (STAATLICHES UMWELTFACHAMT LEIPZIG 1998). Bei der Sichtung der Beschaffenheitsdaten der Gewässerpegel in der Parthe durch die LD Leipzig wurde aber festgestellt, dass die Beschaffenheit auf eine zeitweise extreme Abwasserbelastung des Gewässers schließen lässt und die Gütepegel daher nicht den natürlichen Charakter der Parthe beschreiben (Mitt. DR. INGRID CARMENKE). Auch der Oberlauf der Parthe ist als kritisch belastet einzustufen, was vermutlich auf die landwirtschaftliche Nutzung des Einzugsgebietes und die Abwässer der Anliegerorte zurückzuführen ist (STAATLICHES UMWELTFACHAMT LEIPZIG 1998). Damit sind die Daten bzw. auch das Bearbeitungsgebiet Parthe zumindest nur unter Vorbehalt und nach genauerer Prüfung für Untersuchungen zur langjährigen Temperaturentwicklung geeignet. Das südliche Einzugsgebiet der Parthe ist

weniger (Parthe) bzw. kaum (Schnellbach) anthropogen beeinflusst. Das Einzugsgebiet des Schnellbachs war mehrfach Gegenstand hydrologischer bzw. gewässerkundlicher Untersuchungen. Allerdings handelt es sich hier nur um sehr kleine Teileinzugsgebiete im Verhältnis zum gesamten EZG der Parthe.

Vorhandene Daten

Im nordwestlichen EZG der Parthe befindet sich der Pegel Leipzig-Thekla mit täglichen Durchfluss- und Temperaturmessungen. Es sind weitere Pegel mit Stichtagsmessungen vorhanden (Abbildung 29).

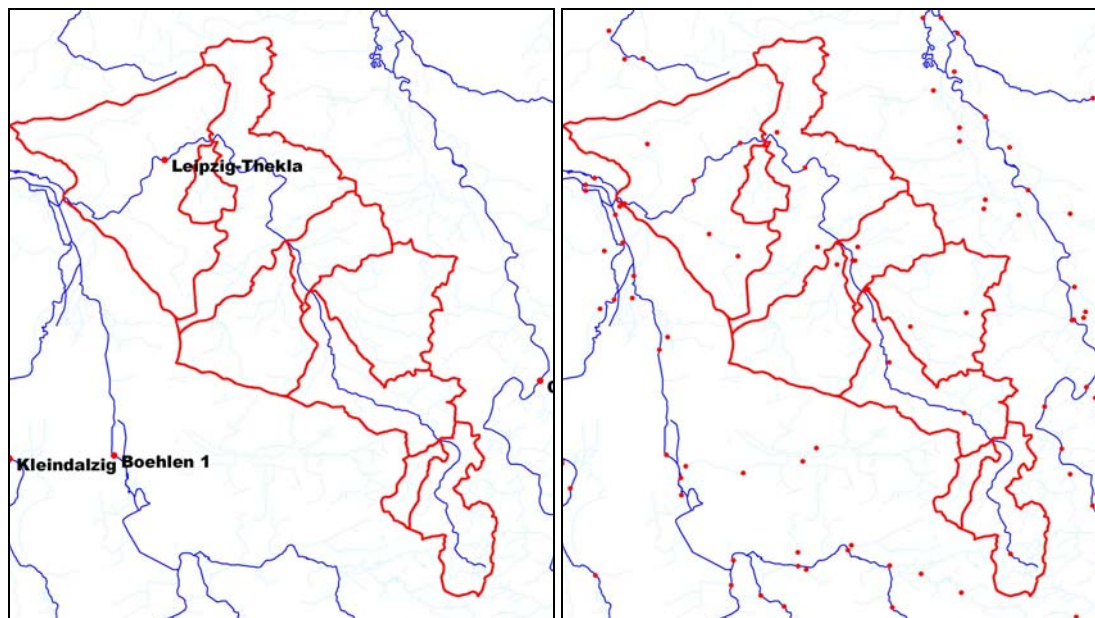


Abbildung 29: Fließgewässerpegel mit täglichen Temperaturmessungen (links) und Stichtagsmessungen (rechts)

Darüber hinaus existieren neun Gewässergütepegel in der Parthe (Abbildung 30).

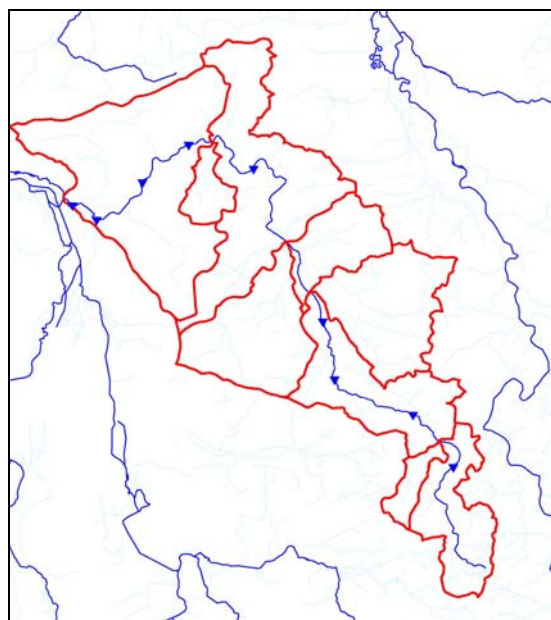


Abbildung 30: Gewässergütepegel

Im EZG der Parthe liegt eine Vielzahl von Messstellen des Sächsischen Messnetzes Grundwasser (Abbildung 31). Die Messstellen mit Stichtagsmessungen wurden u. a. im Zuge der Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie vor allem bei möglicher anthropogener Beeinflussung des Grundwassers errichtet. Im südlichen EZG (Schnellbach, Oberlauf Parthe) liegen keine bzw. nur wenige Messstellen.

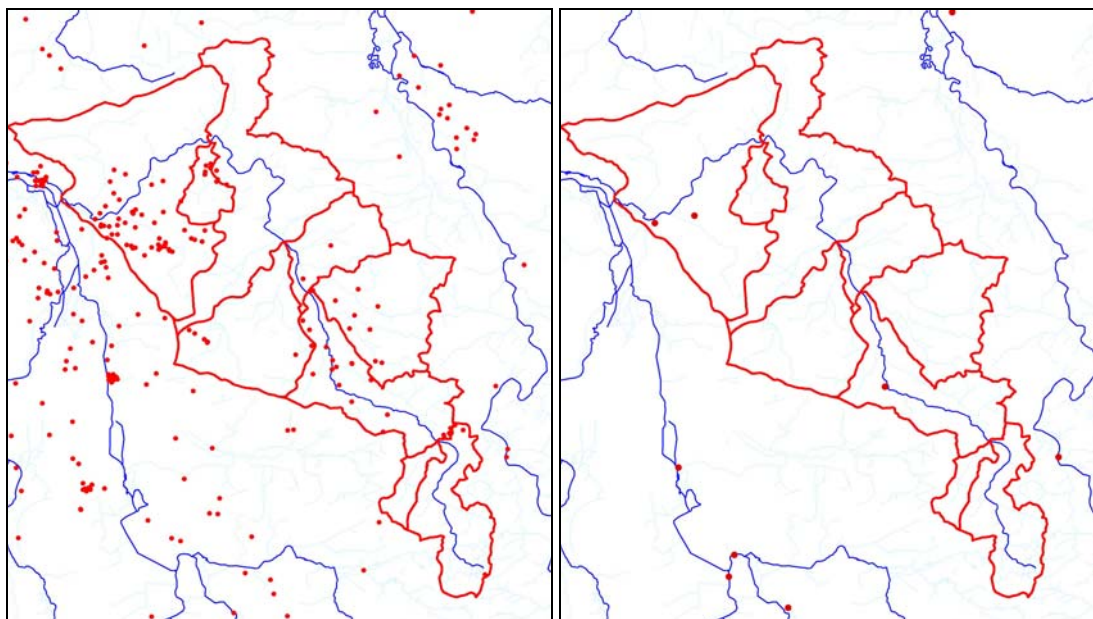


Abbildung 31: Grundwassermessstellen mit Stichtagsmessungen (links) und Datenloggern (rechts)

Im EZG befinden sich keine Messstellen des Agrarmeteorologischen Messnetzes (Abbildung 32), allerdings unterscheiden sich die Stationen Leipzig-Möckern, Spröda, Roda und Methau hinsichtlich der klimatischen Bedingungen kaum von denen des Parthe-Einzugsgebietes und könnten daher als Datengrundlage genutzt werden.

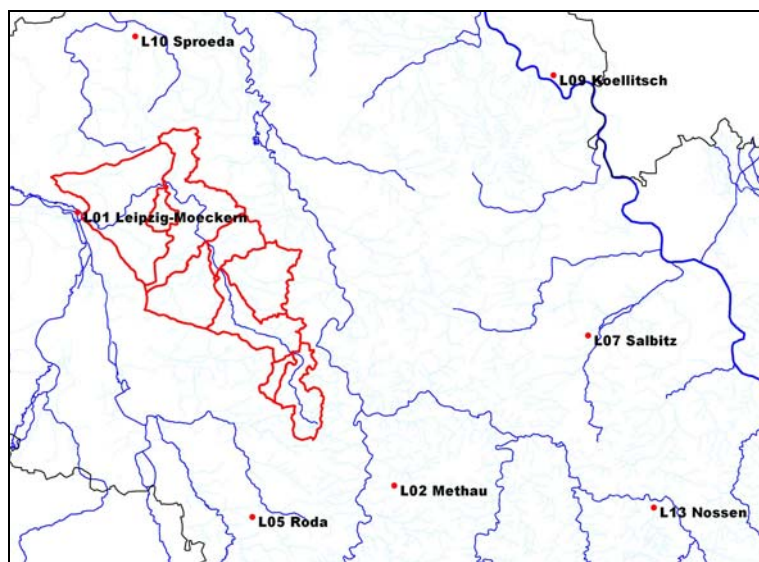


Abbildung 32: Agrarmeteorologische Stationen des LfULG

Von Vorteil bei der Betrachtung des Parthe-EZG als Modellgebiet ist die Lage der Lysimeterstation Brandis und der Station Forstbestand Naunhof in diesem Gebiet und die Klimastationen mit KliWEP-Daten (Abbildung 33).

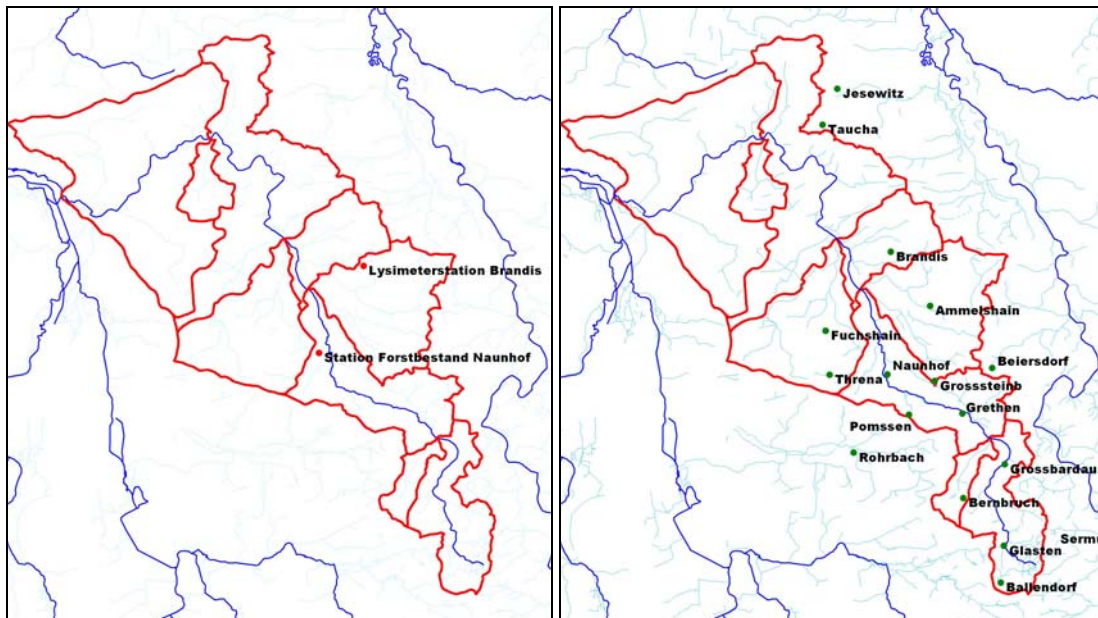


Abbildung 33: Lysimeterstation Brandis und Station Naunhof (links), Klimastationen aus KliWEP (rechts)

Die Level-II-DBF Colditz des SBS befindet sich wenige Kilometer südöstlich der Einzugsgebietsgrenze (Abbildung 34) und könnten ebenfalls für die Charakterisierung des möglichen Untersuchungsgebietes genutzt werden.

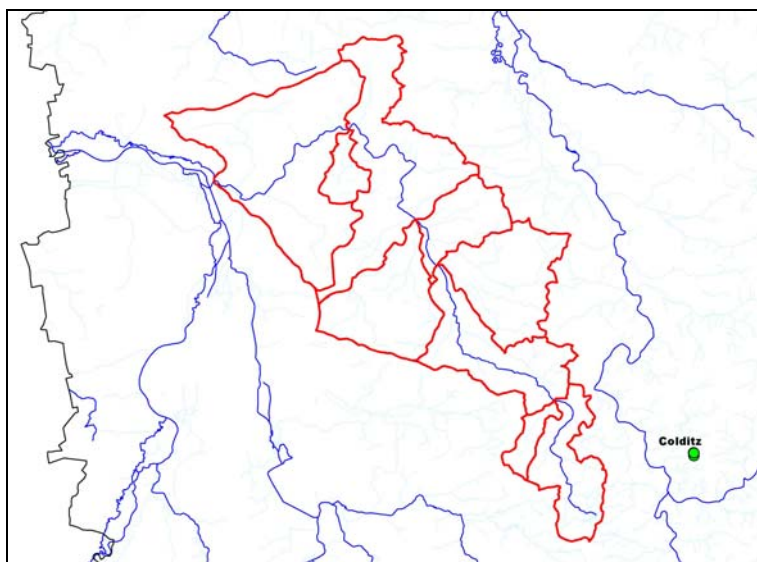


Abbildung 34: Lage der Level-II-Station Colditz des SBS

Im EZG der Parthe befindet sich lediglich eine Klimastation des DWD mit Messdaten und WEREX-IV-Projektionsdaten. Bei der Interpolation der Klimadaten werden weiterhin die Stationen Leipzig-Schkeuditz, Gera-Leumnitz, Torgau, Dresden-Klotzsche berücksichtigt (Abbildung 35).

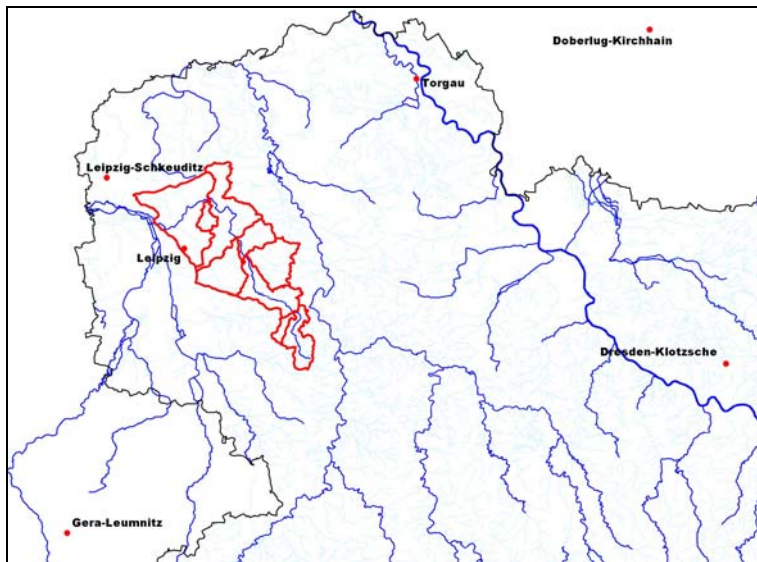


Abbildung 35: DWD-Stationen mit Messreihen des LfULG und WEREX-IV-Projektionsdaten
 (Leipzig = Leipzig-Holzhausen)

Weiterhin können ggf. die Daten der Stationen Oschatz und Altgeringswalde herangezogen werden. Für diese Stationen sind auch gemessene Bodentemperaturen erhältlich (Abbildung 36).

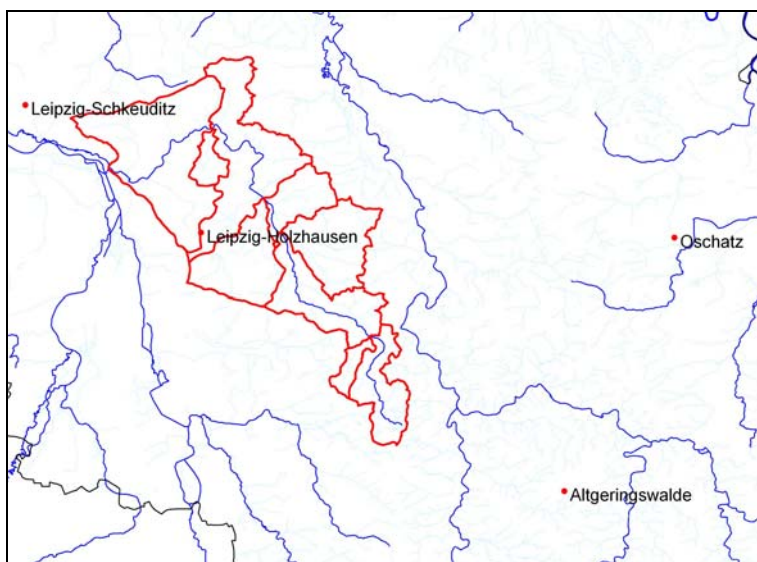


Abbildung 36: Agrarmeteorologische Stationen des DWD

Im Oberlauf der Parthe befinden sich einige Wehre und Stauanlagen. Im gesamten Einzugsgebiet befinden sich kommunale Kläranlagen (Abbildung 37).

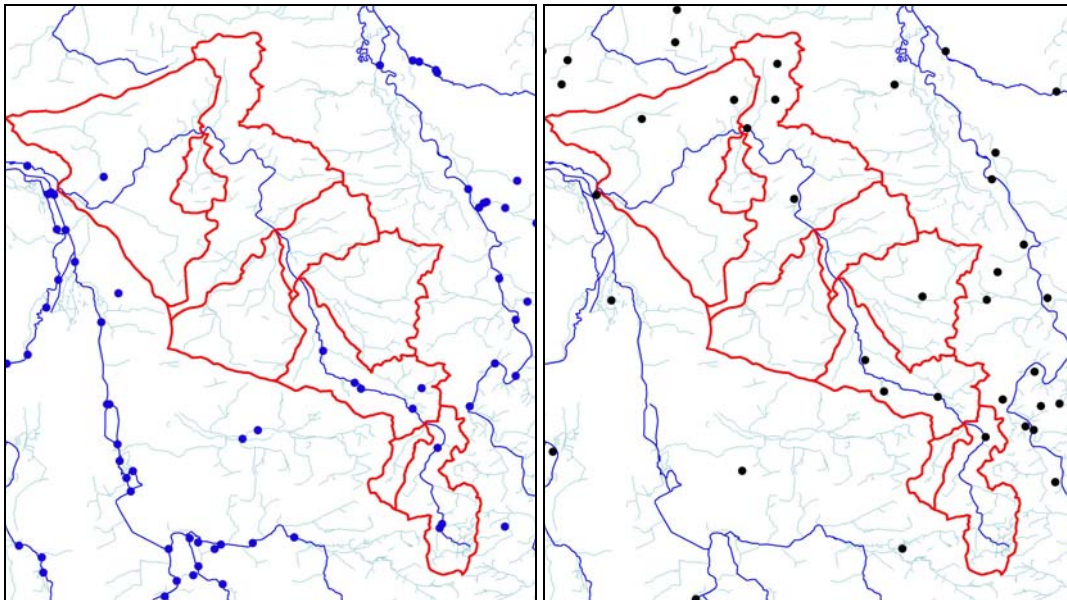


Abbildung 37: Wehre und Stauanlagen aus der Wehrdatenbank (links) und kommunale Kläranlagen (rechts)

Im EZG der Parthe befinden sich derzeit keine aktiven industriellen Einleiter. Das Heizkraftwerk Leipzig-Nord befindet sich nahe am Gebietsabfluss und beeinflusst die Vorfluter im weiteren EZG nicht.

Darüber hinaus sollten beim kommunalen Wasserversorger langjährige Datenreihen des Grundwassers vorliegen. Das Wasserwerk Naunhof versorgt die Stadt Leipzig seit 1887 mit Trinkwasser. Diese Daten könnten im Rahmen einer weitergehenden Studie Verwendung finden.

Weiterhin ist bei der Verwendung des EZG der Parthe als Modellgebiet von Vorteil, dass im Rahmen der KliWEP-Voruntersuchungen umfangreiche Daten recherchiert wurden. Dies betrifft die Ergebnisse der Gewässervermessung, das detaillierte Geländemodell, die relativ sichere Kenntnis des unterirdischen Einzugsgebietes und der Randbedingungen der Grundwasserbewegung, die Flächennutzung einschließlich deren Prognose zum Klimawandel, gemessene Wasserstände und Durchflüsse und insbesondere die prognostizierte Veränderung der Hydrologie im Klimawandel.

Schlussfolgerungen

Das südöstliche Einzugsgebiet der Parthe eignet sich als Modellgebiet für eine weiterführende Studie zu Untersuchung der Auswirkungen des Klimawandels auf die Temperatur verschiedener Kompartimente des Wasserhaushaltes, weil es kaum anthropogen beeinflusst ist. Dies gilt insbesondere für das Einzugsgebiet des Schnellbachs, welches bereits Gegenstand entsprechender Untersuchungen war. Es enthält neben verschiedenen Landnutzungen und den Vorfluter auch ein Standgewässer.

Die genannten Teilgebiete sind relativ klein (Schnellbach: 8 km², Oberlauf Parthe: 33 km³). Soll ein meso- oder makroskaliges Einzugsgebietsmodell angewandt werden, sollte ein anderes gut beobachtetes sächsisches Gewässereinzugsgebiet als Modellgebiet verwendet werden.

4 Homogenisierung und Plausibilisierung der Daten

Zur Homogenisierung und Plausibilisierung der Datensätze wurde eine Vorgehensweise erarbeitet, die es ermöglicht, die jahreszeitliche Überprägung der Wassertemperaturreihen zurückzurechnen. Danach können die Daten wie normalverteilte Stichproben behandelt werden. Damit können statistische Ausreißer identifiziert, getestet und entfernt sowie die Signifikanz von Veränderungen gesichert werden. Außerdem kann bereits anhand weniger Messungen der mittlere saisonale Gang der Wassertemperatur für jede Messstelle quantifiziert werden, d. h. das mittlere Auftreten der Minima und Maxima, die zeitliche Verschiebung hinsichtlich des Lufttemperaturganges und die Amplitude der saisonalen Schwankungen.

4.1 Methodik

Aufgrund der Erdrotation und der nahezu kreisförmigen Bahn der Erde um die Sonne kann die Intensität der direkten Sonneneinstrahlung auf die Erdoberfläche eines Standortes ohne Berücksichtigung von Verlusten in sehr guter Näherung ausschließlich mit Winkelfunktionen beschrieben werden (JUNGHANS 1969). Dies gilt auch mit zeitlicher Verzögerung annähernd für den mittleren Jahresgang der Lufttemperatur. Nach dieser Vereinfachung entspricht die jahreszeitliche Entwicklung der Temperatur im Mittel einer Winkelfunktion nach folgender Gleichung:

$$f(x) = \sin(a + b \cdot x) \cdot c + d$$

mit x Temperatur
 a, b, c, d Parameter

Die Parameter a, b, c und d bestimmen die Verschiebung der Sinuskurve in x - und y -Richtung, die Amplitude und die Periodendauer:

- a Parameter zur Verschiebung in x -Richtung (zeitliche Verschiebung)
- b Parameter zur Festlegung der Periodendauer
- c Parameter zur Festlegung der Amplitude
- d Parameter zur Verschiebung in y -Richtung

Weil die Periodendauer einem Jahr entspricht, ist zur Nachbildung eines jahreszeitlichen Ganges der Parameter stets gleich groß und beträgt nach DVWK (1996):

$$b = (2 \cdot \pi) / 365.2425$$

Die Zahl 365.2425 entspricht der mittleren Andauer eines astronomischen Jahres in Tagen. Der Parameter d entspricht der mittleren Temperatur, der Parameter c der halben Amplitude der Sinuskurve:

$$d = \bar{x}$$
$$c = (x_{\max} - x_{\min}) / 2$$

Damit wird deutlich, dass die Anpassung einer Sinuskurve an gemessene Temperaturen mit Vorgabe des Mittelwertes der Temperatur (Parameter d) und mit Anpassung der Parameter a und c unter Minimierung der Abweichungen möglich ist. Der Parameter c kann vorläufig geschätzt werden anhand der gemessenen Minima und Maxima. Die Anpassung erfolgt solange, bis die Summe der quadratischen Abweichungen zwischen Messwerten und angepasster Kurve ihr Minimum erreicht (vgl. Abbildung 38).

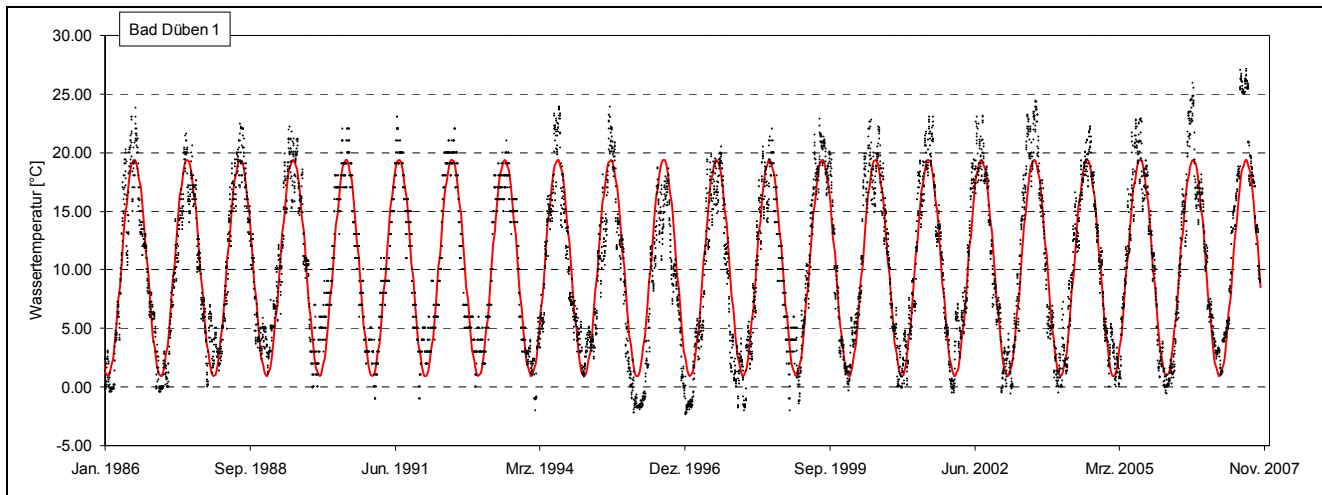


Abbildung 38: Beispiel einer angepassten Sinusfunktion an gemessene Temperaturdaten (Fließgewässer)

Nach der Anpassung der Winkelfunktion kann aus den Parametern a und c die zeitliche Entwicklung (Verzögerung zur Lufttemperatur, Amplitude) quantifiziert werden, wodurch ein objektiver Vergleich verschiedener Messstellen möglich wird. Weiterhin kann die Zeitreihe anhand der Residuen, d. h. anhand der vom Jahresgang bereinigten Temperaturen, auf nichtperiodische Veränderungen geprüft werden. Letztlich werden anhand der Residuen Ausreißer erkennbar und können statistisch getestet werden.

Anhand der folgenden exemplarischen Darstellung einer Anpassung und der Residuen wird deutlich, dass die Messwerte aufgrund der jahreszeitlichen Schwankungen u. U. einen zeitlichen Trend zeigen, der nach Bereinigung der Periodizität nicht bestätigt werden kann.

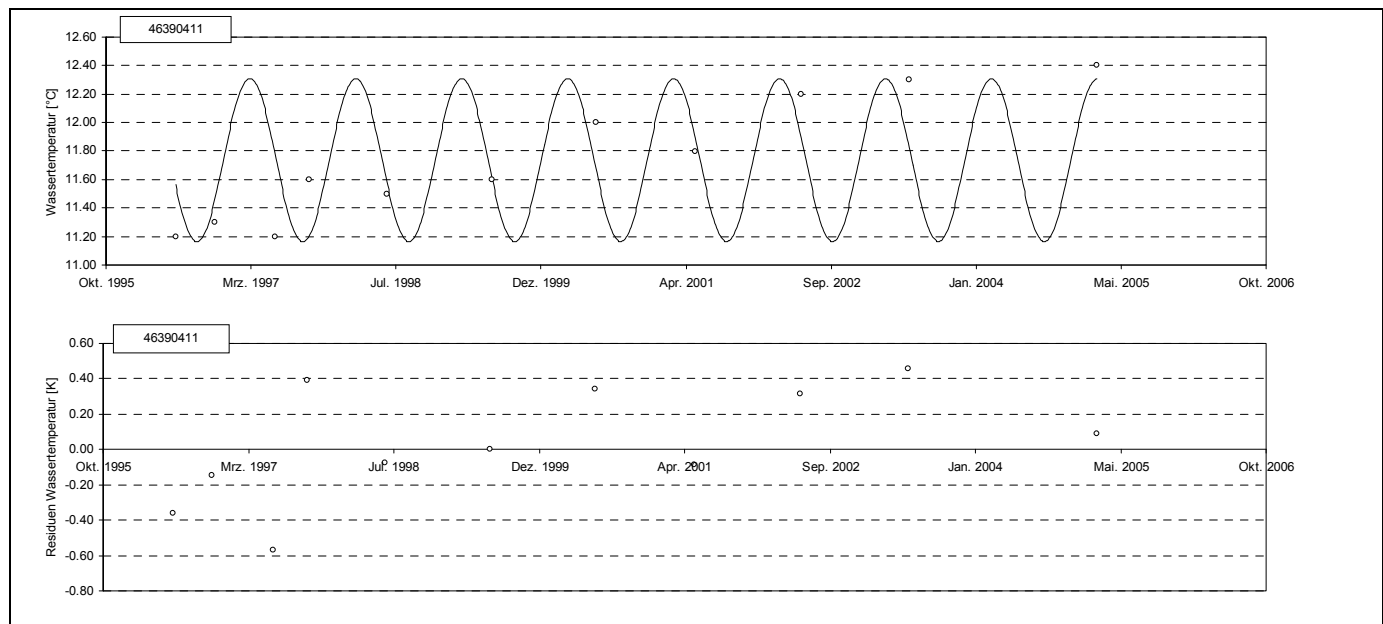


Abbildung 39: Angepasste Sinusfunktion an Grundwassertemperaturen (oben) und Darstellung der Residuen (unten)

Folgende Daten wurden als Ausreißer bewertet bei geringen Anzahlen an Messdaten ($n \leq 25$):

$$x < Q_1 - 3(\bar{x} - Q_1) \text{ oder } Q_3 + 3(\bar{x} - Q_1) > x$$

mit x mutmaßlicher Ausreißer (Residuum in [K])
 \bar{x} Mittelwert der Residuen in [K]
 Q_1, Q_3 erstes und drittes Quartil der Residuen in [K]

Waren eine größere Anzahl von Messwerten vorhanden ($n > 25$), wurde ein Ausreißertest mit der Testgröße

$$T_1 = \left| \frac{x_1 - \mu}{\sigma} \right|$$

mit T_1 Testgröße
 x_1 mutmaßlicher Ausreißer [K]
 μ Mittelwert der Residuen [K]
 σ Streuung der Residuen [K]

durchgeführt, wobei der Mittelwert mit dem arithmetischen Mittel aus den Residuen und die Streuung mit der Standardabweichung der Residuen geschätzt wurden. Die Testgröße wurde mit den oberen Signifikanzschranken der standardisierten Extremabweichung für das Signifikanzniveau $\alpha = 0.95$ als Prüfgröße verglichen und Werte als Ausreißer aus der Datenbank entfernt, deren Testgröße die Prüfgröße überschreiten. Werte, die aufgrund eines zeitlichen Trends von den übrigen Daten abweichen, wurden nicht als Ausreißer bewertet.

4.2 Ergebnisse

Die Anzahlen der Messstellen und Temperaturwerte, die auf Plausibilität geprüft und in die Projektdatenbank aufgenommen wurden, sind in Tabelle 19 gelistet. Insgesamt enthält die Projektdatenbank ca. 600 000 Datensätze.

Tabelle 19: Auf Plausibilität geprüfte und in die Projektdatenbank aufgenommene Datenanzahlen

| Datenquelle | Anzahl Messpunkte | Anzahl Datensätze |
|---|-------------------|-------------------|
| Fließgewässer | | |
| Fließgewässerpegel mit täglicher Messung der Wassertemperatur des LfULG | 29 | 211942 |
| Daten der Stichtagsmessungen des LfULG in Fließgewässerpegeln | 1251 | 58405 |
| Messdaten der Gütepegel der Parthe der LD Leipzig | 9 | 2417 |
| Oberflächenwassermessstellen der WISMUT GmbH | 26 | 5195 |
| Standgewässer | | |
| Daten der Landestalsperrenverwaltung: Speicher Witznitz | 1 | 2426 |
| Daten der Landestalsperrenverwaltung: andere | 4 | 4353 |
| Daten Kulkwitzer See der LD Leipzig | 2 | 1519 |
| Oberflächenwassermessstellen der WISMUT GmbH | 2 | 62 |
| Grundwasser | | |
| Daten des sächsischen Messnetzes Grundwassermessstellen des LfULG | 1186 | 8488 |

| Datenquelle | Anzahl Messpunkte | Anzahl Datensätze |
|--|-------------------|-------------------|
| Loggerdaten des LfULG | 92 | 59597 |
| Daten der Wettin- und Eisenquelle Bad Brambach | 2 | 1811 |
| Daten der Grundwassermessstellen der LD Chemnitz | 560 | 2892 |
| Daten des Umweltmonitorings der WISMUT GmbH | 77 | 2572 |
| Bodenwasser | | |
| Daten des agrarmeteorologischen Messnetzes des LfULG | 14 | 126570 |
| Daten der Lysimeterstation Brandis der BfUL | 1 | 35254 |
| Daten der Bodenhydrologischen Station Forstbestand Naunhof der BfUL | 1 | 4854 |
| Daten der Level-II-Dauerbeobachtungsflächen des Staatsbetriebes Sachsenforst | 8 | 0 |
| Daten der Sächsischen Akademie der Wissenschaften Bad Brambach | 1 | 7670 |
| Daten der bodenhydrologischen Messflächen der WISMUT GmbH | 5 | 33303 |

Nach der beschriebenen Anpassung der Winkelfunktionen wurden die Residuen visuell auf zeitliche Veränderungen überprüft. Mutmaßliche Ausreißer wurden getestet. Es konnten folgende Ausreißer sicher identifiziert und aus der Datenbasis entfernt werden:

| | |
|--|---------------|
| Fließgewässerpegel mit täglicher Messung des LfULG | 6 Ausreißer |
| Stichtagsmessungen Fließgewässerpegel des LfULG | 48 Ausreißer |
| Standgewässermessstellen der WISMUT GmbH | 1 Ausreißer |
| Stichtagsmessungen Grundwassermessstellen LfULG | 271 Ausreißer |
| Loggerdaten Grundwassermessstellen LfULG | 55 Ausreißer |
| Daten der Wettin- und Eisenquelle Bad Brambach | 2 Ausreißer |
| Daten der Grundwassermessstellen LD Chemnitz | 41 Ausreißer |
| Grundwassermessstellen der WISMUT GmbH | 38 Ausreißer |

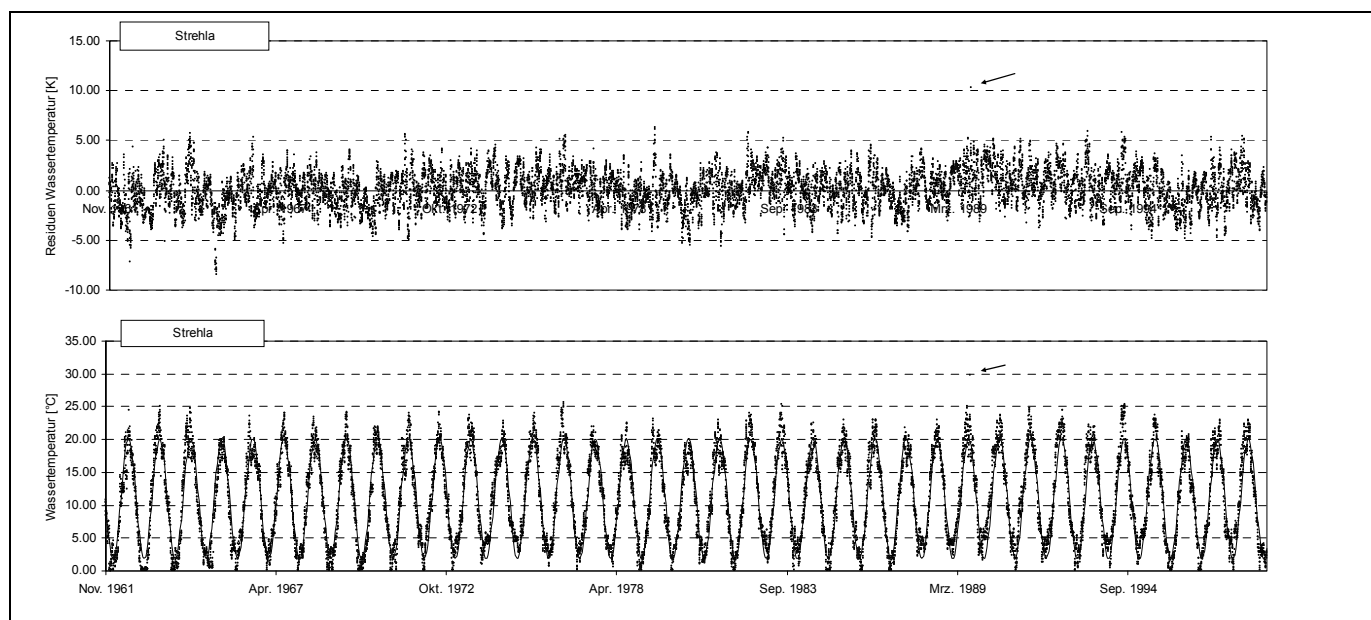


Abbildung 40: Fließgewässer-Temperaturreihe mit einem als Ausreißer identifizierten Messwert

4.2.1 Lufttemperatur

Der Verlauf der gemessenen und interpolierten Lufttemperatur ist exemplarisch für einige der 59 Klimaregionen nach Abschnitt 3.6 dargestellt. Deutlich zu erkennen ist der jahreszeitliche Verlauf der Lufttemperatur. Wird dieser zurückgerechnet, verbleiben annähernd normalverteilte Residuen. Die größten Abweichungen vom langjährigen Jahrgang finden in den Wintermonaten statt und betreffen extrem tiefe Temperaturen.

Die Residuen zeigen über den ca. 20-jährigen Auswertzeitraum in allen ausgewählten Klimaregionen einen schwach ansteigenden Trend. Dieser liegt zwischen +0.6 K und +1.2 K im betrachteten Zeitraum.

4.2.2 Fließgewässerpegel mit täglicher Messung der Temperatur des LfULG

Die Daten der täglichen Messungen in Fließgewässerpegeln des LfULG zeigen in ihrem sinusförmigen Verlauf Ähnlichkeiten zur Lufttemperatur. Lediglich fehlen die deutlichen Abweichungen in den Wintermonaten nach unten, vielmehr sinkt die gemessene Wassertemperatur nur selten unter 0 °C. Im Sommer kann der mittlere Erwartungswert nahe an 20 °C heranreichen, die tatsächlichen Temperaturmaxima können in Ausnahmefällen auf 30 °C steigen (z. B. Pegel ErlIn, 1994).

An einigen Messstellen wurde die Genauigkeit der Temperaturofzeichnung im Laufe der Zeit verändert. Bei starker Rundung resultiert im Zeitverlauf ein rasterähnliches Bild. Dies hat keine Auswirkung auf die Aussagefähigkeit der Daten, vorausgesetzt, es wurden keine systematischen Veränderungen z. B. bei Messtechnik, -tiefe oder -ort vorgenommen.

Die Messreihen der Fließgewässer reichen zum Teil bis in die 1950er-Jahre. Damit werden langfristige Trends erkennbar. Der Zeitpunkt der täglichen Temperaturmessung um 07:00 Uhr wurde offensichtlich während des gesamten Messzeitraumes nicht verändert, sodass konsistente Datenreihen vorhanden sind, die auf langfristige Veränderungen hin untersucht werden können. Die langfristige Entwicklung wurde in Abbildung 41 in Form von Mittelwerten unterschiedlicher Messstellen für drei Zeiträume grafisch dargestellt.

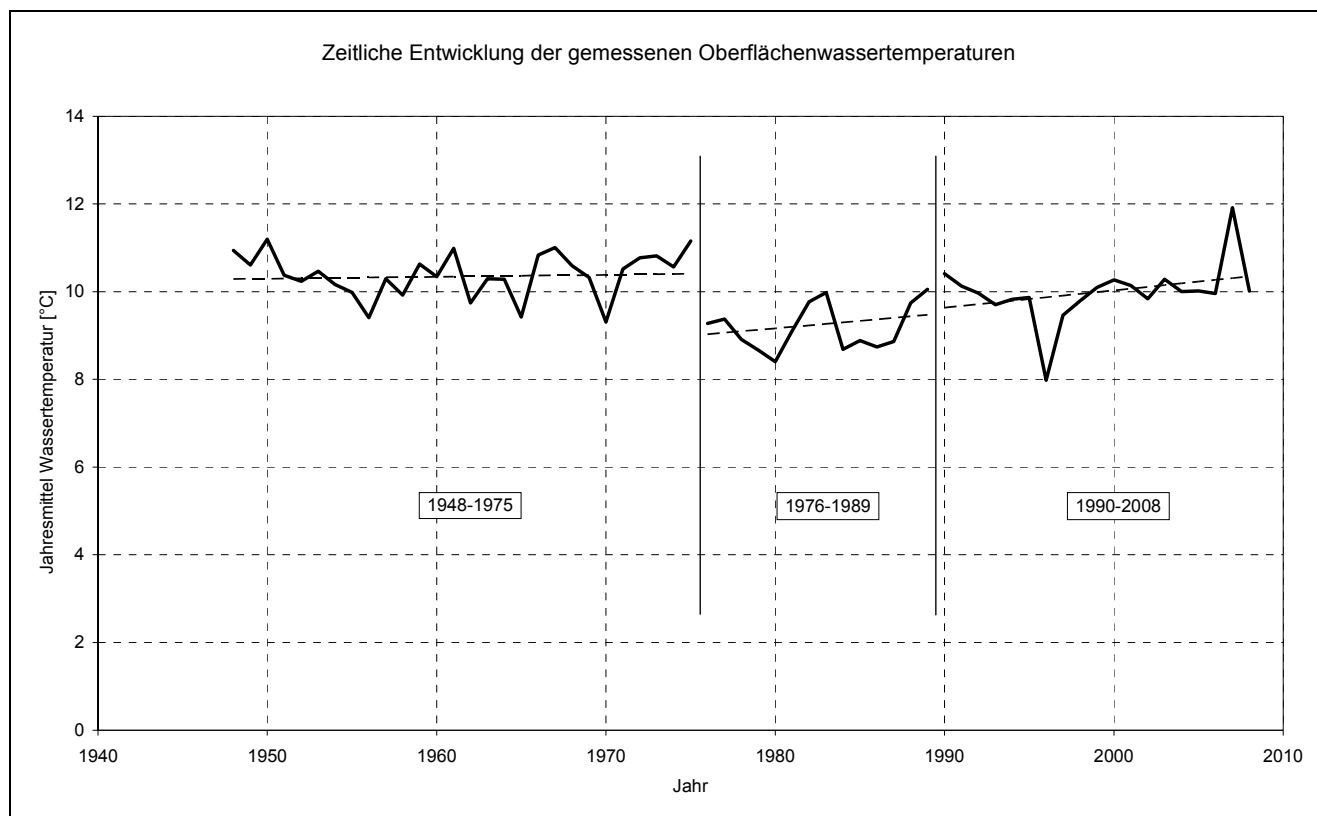


Abbildung 41: Langfristiger Trend der mittleren Jahrestemperaturen in Fließgewässern

Anhand der grafischen Darstellung kann für den Zeitraum 1948 bis 1975 (nur Messstelle Dresden, Elbe, dargestellt) keine zeitliche Veränderung festgestellt werden. Für die beiden späteren Zeitintervalle wurden jeweils andere Messstellen kombiniert, um Mittelwerte zu berechnen. Im Ergebnis resultiert sowohl für den Zeitraum 1976-1989 als auch für den Zeitraum 1989-2008 ein ansteigender Trend (Abbildung 41).

4.2.3 Standgewässertemperaturen: Speicherbecken Witznitz

Die jahreszeitliche Entwicklung wurde exemplarisch für das Speicherbecken Witznitz ausgewertet. Dabei wurde zunächst nur die Temperaturentwicklung in Abhängigkeit von der Messtiefe berücksichtigt. Die Überleitung von Wasser aus der Freiburger Mulde in das Speicherbecken über den Steingrundbach und die Eula ist bei einer näheren Untersuchung des Speicherbeckens ebenso zu berücksichtigen wie die Bewirtschaftung des Speichers. Weil im Laufe der Zeit wasserwirtschaftliche Veränderungen stattgefunden haben (Überleitung mit Unterbrechungen, Ertüchtigung der Überleitung u. a.), sind Aussagen zu langfristigen Veränderungen der Wassertemperatur aufgrund klimatischer Veränderungen nicht möglich.

Die mittleren Jahressgänge sind in Abhängigkeit von der Tiefe in der Abbildung 42 dargestellt. Die Abnahme der jahreszeitlichen Schwankungen mit zunehmender Tiefe und eine zeitliche Verzögerung der Temperaturentwicklung sind deutlich zu erkennen. Die Wassertemperatur an der Oberfläche ist sowohl im Sommer als auch im Winter deutlich höher als die Lufttemperatur. Im Herbst beginnt die oberflächennahe Wassertemperatur unter die der tieferen Schichten zu sinken.

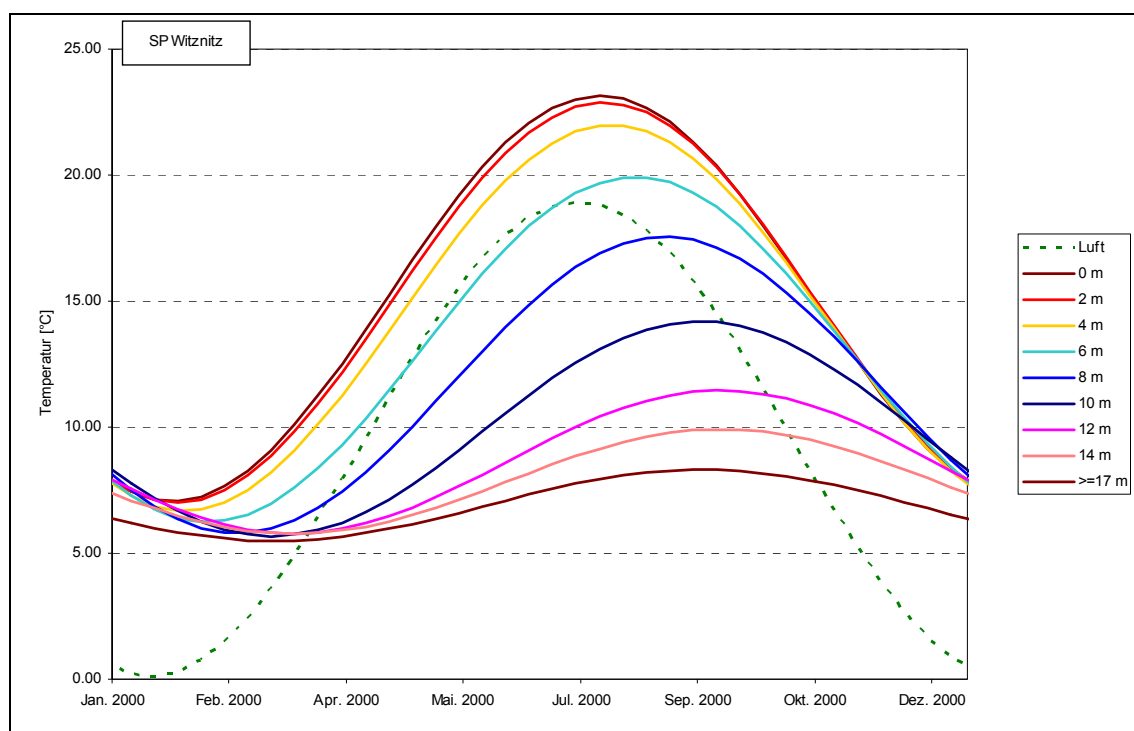


Abbildung 42: Mittlere Jahressgänge der Wassertemperatur, Speicher Witznitz

Die starke Vereinfachung mittels der Jahressgänge ist nicht geeignet, auf die Zeitpunkte der vertikalen Durchmischung von Standgewässern zu schließen. Hierzu sind die im konkreten Jahresverlauf gemessenen Temperaturen heranzuziehen. Für das weitere Vorgehen ist zu empfehlen, bei temperaturgeschichteten Gewässern – eine ausreichende Datendichte vorausgesetzt – die Dauer der sommerlichen Temperaturschichtung und bei allen Standgewässern die der winterlichen Eisbedeckung mit zu erfassen und auszuwerten.

4.2.4 Messnetz Grundwassermessstellen des LfULG (Stichtagsmessungen)

Analog zu den Oberflächenwassertemperaturen wurden mittlere Jahresverläufe der Grundwassertemperaturen und die Abweichungen der Messwerte vom mittleren Erwartungswert berechnet. Messstellen mit typischen Verläufen und Abweichungen von solchen sind in Tabelle 20 aufgelistet.

Tabelle 20: Messstellen mit typischen Verläufen der Grundwassertemperatur und Abweichungen von solchen

| Verlauf der Grundwassertemperatur bzw. Abweichungen | Messstellennummern |
|--|---|
| Probleme beim Ableiten von jahreszeitlichen Verläufen aufgrund nur einer Messung jährlich zur gleichen Jahreszeit | 45466012, 46390290_a, 47390048, 47400057 |
| Probleme beim Ableiten von jahreszeitlichen Verläufen aufgrund zweier Messungen jährlich jeweils im Frühjahr und im Herbst | 46410417 |
| Kein zeitlicher Trend | 45466018, 45466023 |
| Temperaturen zeitlich konstant | 46400708 |
| Zeitreihen ohne periodischen Trend | 46390170_2 |
| Zeitreihen ohne periodischen Trend, starke nichtperiodische Streuung | 45466025 |
| Periodischer Trend unsicher (keine Anpassung der Winkelfunktion möglich) | 46400067 |
| Gute Anpassung bei 3 Messungen | 44529001, 46390288 |
| Gute Anpassung bei 4 Messungen | 45509001, 46390003, 46392307 |
| Gute Anpassung bei 4 Messungen, über langem Messzeitraum | 47400014_2 |
| Gute Anpassungen bei >3, aber insgesamt wenigen Messungen | 45466006_1, 45466007_1, 4546008, 45466021, 45466024, 46390270, 46393719, 46476443, 46492205 |
| Weniger gute Anpassungen bei >3, aber insgesamt wenigen Messungen | 46476424 |
| Regelmäßige Beprobung 2x jährlich: jeweils Sommer und Winter | 45400013_1, 47410030, 474100P7, 474100P8, 47410402, 47410412 |
| Viele Messungen, aber weniger gute Anpassung möglich | 46516601_1 |
| Deutlicher periodischer Verlauf | 45420012, 46420003, 46466046_1, 4654S00040_1, 4654S00070_1, 4655T0001, 47390048 (mit Langzeittrend), 47410029, 47410030, 474100P7, 474100P8, 47410402, 47410412, 53452290 |
| Abnahme der jahreszeitlichen Schwankungen bei zunehmender Entnahmetiefe | 45400013, 4654S00040 |
| Langfristiger Temperaturanstieg, Zunahme der Streuung | 45410001_1 |
| Langfristiger Temperaturanstieg | 45410001_2, 45430001, 45466003, 46390138, 4646001, 46476402, 47410014, 49430001, 49452003, 49484012, 50422736, 50452248!, 50476004, 50486002, 54412001 |
| Langfristige Temperaturabnahme | 45466010 (undeutlich), 45466012, 46400106_2, 46466046_1 (undeutlich), 49486528, 49486603_2 |
| Sehr starke periodische Streuung | 45411089 |
| Nur angedeutete Periodizität | 45420004, 45430522_a |
| Veränderungen der Amplitude | 45476067 |
| Scheinbarer langfristiger Trend bei Betrachtung der Messdaten | 46390411, 46390619, 48476232 |
| Nur an Residuen erkennbare langfristige Veränderung | 47390048, 47400057 |
| Langzeitentwicklung | 46506624 |

Die jahreszeitliche Amplitude der Grundwassertemperaturen ist erwartungsgemäß meist deutlich kleiner als die der Oberflächenwassertemperaturen. Zusätzlich reichen die bisher ausgewerteten Daten meist lediglich bis in die 1990er-Jahre zurück und umfassen oft nur eine bis zwei Messungen im Jahr. Damit sind sowohl jahreszeitliche Entwicklungen als auch langfristige Veränderungen schwieriger zu erkennen. Bei der Mehrheit der Messstellen ist jedoch eine deutliche jahreszeitliche Temperaturschwankung erkennbar.

An vielen Messstellen wurden im Zeitraum vor ca. 1998/99 tiefere Grundwassertemperaturen gemessen als im späteren Zeitraum. Die Differenz beträgt ca. 0.5 K. Dabei handelt es sich um die Auswirkungen einer Veränderung des Messverfahrens (Umstellung auf Durchflussmesszelle bei den Grundwasser-Probenahmen). Eine typische Veränderung dieser Art ist in Abbildung 43 dargestellt.

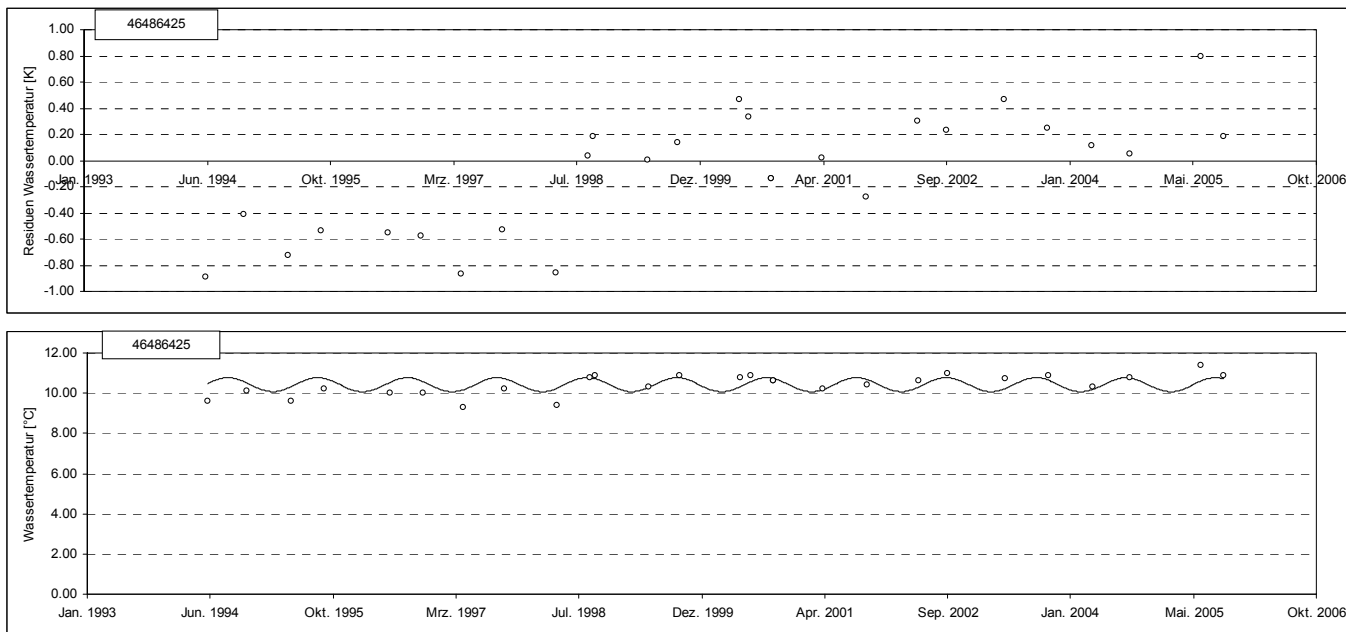


Abbildung 43: Veränderung der Grundwassertemperatur als Folge der Umstellung des Messsystems (1998)

Abgesehen von der genannten Unregelmäßigkeit zeigen einige Messstellen mit längeren Datenreihen eine deutliche Veränderung der Grundwassertemperatur. Dies kann exemplarisch anhand Abbildung 44 gezeigt werden.

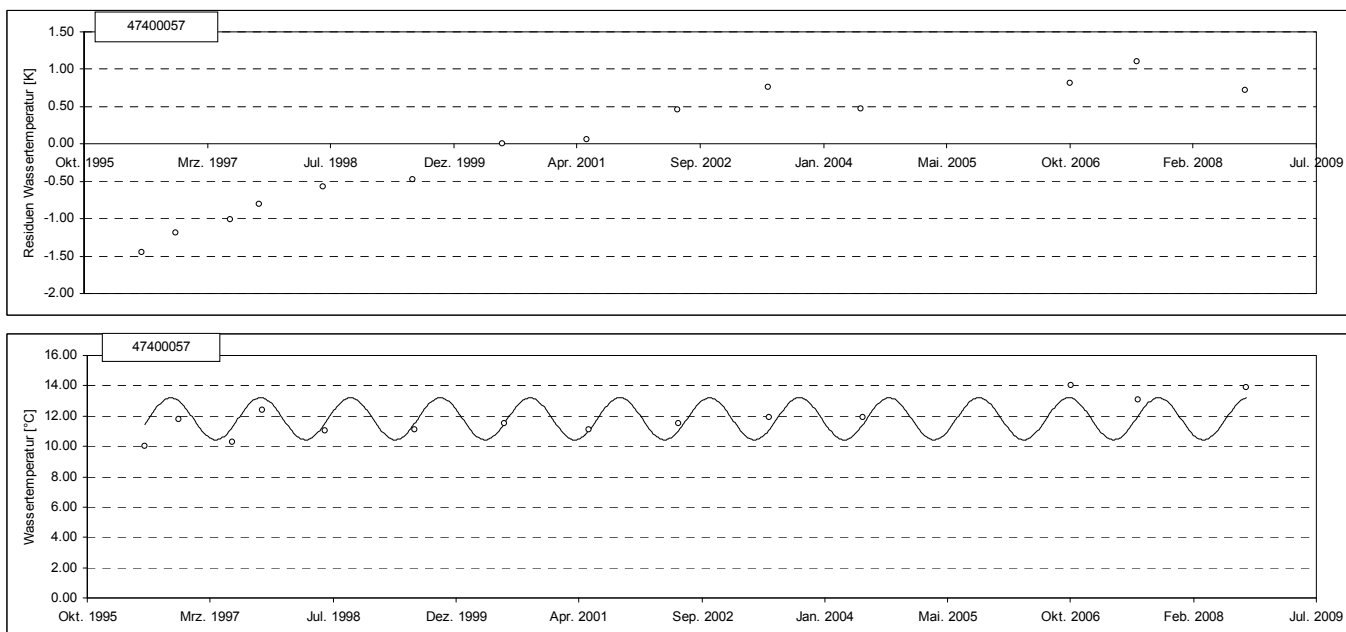


Abbildung 44: Exemplarische Darstellung einer zeitlichen Veränderung der Grundwassertemperatur

Dabei deutet sich bei der Mehrheit der Messstellen mit zeitlichen Veränderungen ein geringfügiger Anstieg der Grundwassertemperatur an, bei einigen Messstellen ging die Grundwassertemperatur auch tendenziell zurück. Beim größten Teil der Messstellen sind keine zeitlichen Veränderungen der Grundwassertemperatur festzustellen, entweder aufgrund des kurzen Beobachtungszeitraumes, der geringen Anzahl an Daten oder den starken Streuungen der Temperaturen.

Die Messstelle mit der längsten Beobachtungsreihe ist in Abbildung 45 dargestellt. Auch hier wurde offensichtlich im Jahr 1998 die Messmethodik umgestellt. Im Zeitraum davor deutet sich undeutlich eine Temperaturabnahme an. Signifikante Veränderungen sind aufgrund der starken Streuung nicht festzustellen.

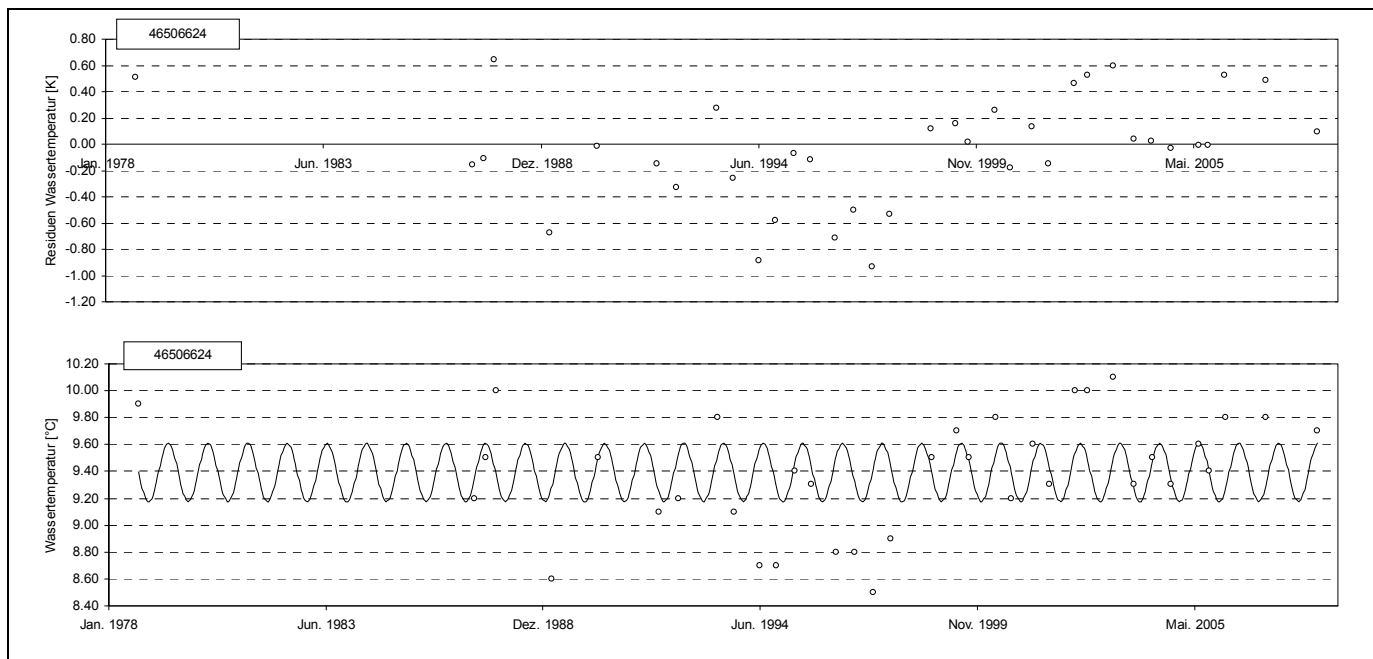


Abbildung 45: Exemplarische Darstellung der Messdaten über einen langen Zeitraum

4.2.5 Loggerdaten Grundwassertemperatur des LfULG

Die Datenreihen überstreichen einen vergleichsweise kurzen Messzeitraum. Die Grundwassertemperatur zeigt meist sehr deutliche jahreszeitliche Schwankungen um wenige Grade. Vielen Messstellen ist ein Rückgang der Grundwassertemperatur im bisherigen Messzeitraum gemeinsam (Abbildung 46). Die Abweichungen vom mittleren Jahresgang verändern sich oft in mehrmonatigen Abständen.

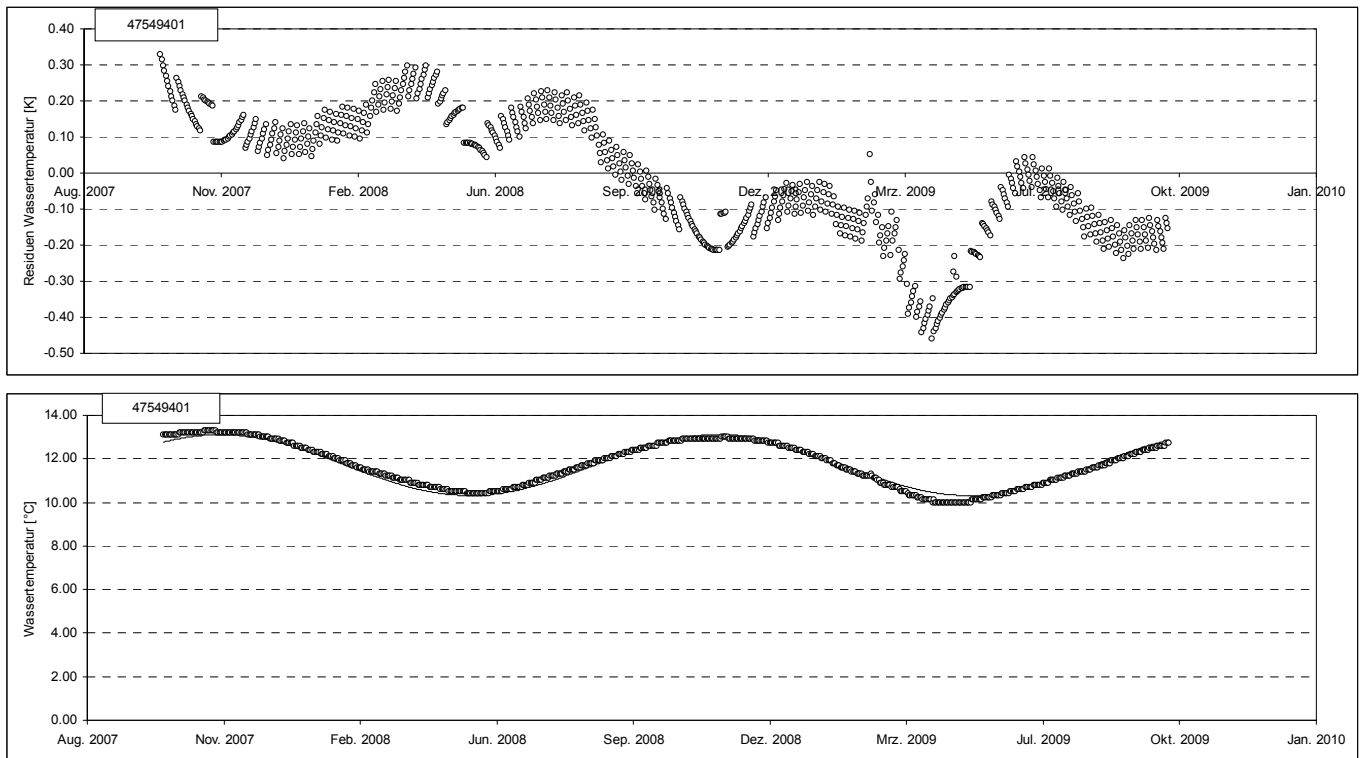


Abbildung 46: Exemplarische Darstellung einer typischen Temperaturentwicklung in den letzten beiden Jahren

4.2.6 Daten der bodenhydrologischen Messflächen

Die auf bodenhydrologischen Untersuchungsflächen gemessenen Bodenwassertemperaturen sowie die Daten des Agrarmeteorologischen Messnetzes, der Bodentemperaturen Bad Brambach des SAW und der Messflächen der WISMUT GmbH zeigen in den oberen Tiefen Ähnlichkeiten mit der Lufttemperatur, die nichtperiodischen Streuungen der Messwerte um den mittleren Verlauf sind stark und nehmen mit zunehmender Tiefe ab. Dabei ist im ausgewerteten Zeitraum 1992-2009 eine geringfügige, aber deutliche Zunahme der mittleren Bodentemperatur festzustellen. Diese Zunahme fand in größeren Tiefen stärker statt als oberflächennah.

In Abbildung 47 sind die mittleren Jahrgänge der Bodenwassertemperaturen in unterschiedlichen Tiefen dargestellt. Es wird sowohl eine zunehmende zeitliche Verzögerung des Jahrganges deutlich als auch eine deutliche Abnahme der Amplitude. Im Unterschied zur Wassertemperatur von Standgewässern ist hier weder eine horizontale Schichtung vorhanden noch übersteigen die Bodentemperaturen an der Bodenoberfläche – sofern Bewuchs vorhanden ist – die Lufttemperaturen in wesentlichem Maße.

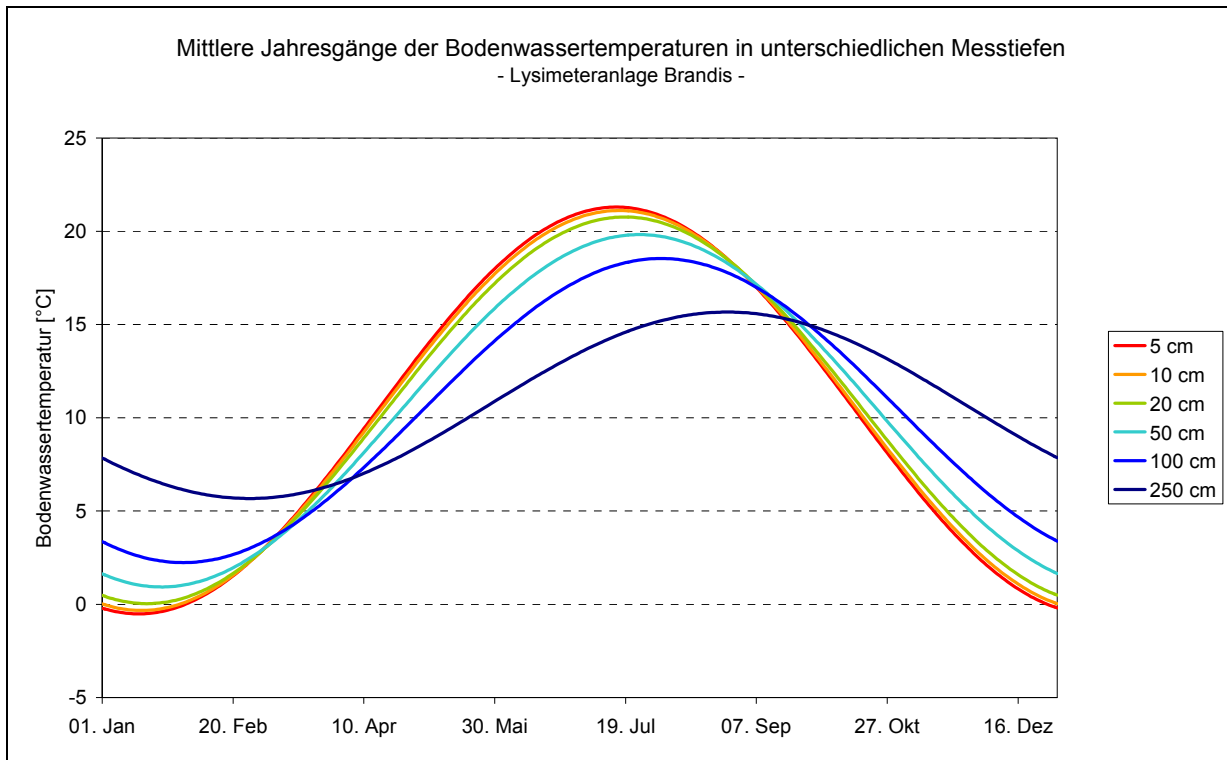


Abbildung 47: Mittlere Jahressgänge der Bodenwassertemperatur in unterschiedlichen Tiefen

4.2.7 Zusammenfassung

Die im Rahmen der Vorstudie gesammelten und bereits in die Projektdatenbank integrierten Messdaten der Temperatur von Oberflächen-, Grund- und Boden-/Sickerwasser umfassen ca. 600.000 Datensätze. Sie wurden weitgehend homogenisiert, einer Plausibilitätskontrolle unterzogen und statistische Ausreißer entfernt. Es verbleibt ein Sprung bei den Temperaturreihen des Grundwassers (Stichtagsmessungen), der auf eine Veränderung der Messmethodik zurückgeht. Dies sollte bei der Anwendung der Daten zur Modellkalibrierung oder weiterführenden statistischen Auswertung beachtet werden. Weitere Schwierigkeiten bestehen bei der Auswertung der Daten der Standgewässer, insbesondere wenn Rückschlüsse auf die limnologische Schichtung des Gewässers gezogen werden sollen, weil durch Gewässerbewirtschaftung und sonstige Einflüsse die Temperaturentwicklung beeinflusst wird. Die Datenreihen des Grundwassers reichen oft nicht weit in die Vergangenheit. Abgesehen von den aufgezeigten Schwierigkeiten ist die Datenbasis umfangreich und kann der weiterführenden statistischen Auswertung und Modellkalibrierung dienen. Hier ist hervorzuheben, dass den Datensätzen die meteorologischen Daten zugeordnet wurden, sodass unabhängig vom Standort der Messstelle ein Bezug zur Lufttemperatur und Globalstrahlung als die wesentlichen Einflussgrößen hergestellt werden kann.

5 Modelle

5.1 Statistische Ansätze und numerische Modelle

Eine Möglichkeit der statistischen Auswertung und Ableitung von Zusammenhängen zwischen der Lufttemperatur und der Wassertemperatur besteht im Vergleich der mittleren Jahresgänge dieser Größen. Hier ist lediglich die Periodendauer konstant und beträgt ein Jahr, die übrigen Parameter des Jahresganges können u. U. aus der Lufttemperatur als Einflussgröße abgeleitet werden. Damit ließe sich die Wassertemperatur anhand der Lufttemperatur des Klimamodells prognostizieren unter expliziter Berücksichtigung der zeitlichen Verschiebung zwischen Luft- und Wassertemperatur. Voraussetzung ist allerdings ein enger Zusammenhang zwischen Lufttemperatur und Wassertemperatur wie dies z. B. für das oberflächennahe Bodenwasser der Fall ist. Erschwerend wirkt sich die unterschiedliche Vegetationsbedeckung aus, welche die aktive Oberfläche für den Wasser- und Energiehaushalt von der Bodenoberfläche weg verschiebt. Die Vegetation selbst und deren Rückwirkungen auf die Bodentemperatur können sich im Zuge des Klimawandels verändern. Weiterhin können mit statistischen Ansätzen physikalische Vorgänge nicht explizit berücksichtigt werden wie z. B.

- der Einfluss der Bodenart, des Humusgehaltes und der Wassergehaltdynamik auf die Wärmeleitfähigkeit des Bodens,
- der Einfluss des Bodenwassertransports auf die Bodentemperatur,
- die untere Randbedingung, d. h. die Temperatur des Grundwassers oder tieferer geologischer Schichten, weil lediglich die Lufttemperatur als Einflussgröße berücksichtigt wird.

Letztlich ist nicht bekannt, inwieweit sich die Zusammenhänge zwischen den atmosphärischen Bedingungen und der Wassertemperatur selbst verändern. Eine Übertragung von statistischen Zusammenhängen, die anhand der Iststandsdaten abgeleitet wurden, auf zukünftige veränderte Verhältnisse ist deshalb mit entsprechenden Unsicherheiten verbunden. Aus diesem Grunde sollte für die Prognose der Wassertemperatur dem Einsatz physikalisch fundierter Modelle der Vorrang gegeben werden.

5.2 Statistische Ansätze

5.2.1 Doppelsummenanalyse

Die Doppelsummenanalyse ist ein Verfahren, mit dem Veränderungen der Zusammenhänge zwischen Einfluss- und Zielgröße untersucht werden können. Es wird u. a. in der Hydrologie angewandt zur Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Niederschlag und Durchfluss (DYCK & PESCHKE 1989).

Die Doppelsummenanalyse kann folgende Fragen beantworten:

- Ist das Beobachtungsmaterial homogen?
- Welche Werte sind beeinflusst? (Dauer der Beeinflussung)
- Wie sind die Werte beeinflusst? (Art und Weise der Beeinflussung)
- Wie kann das Beobachtungsmaterial bereinigt werden?

Bei der Doppelsummenanalyse werden die aufsummierte unbeeinflusste Bezugsreihe (Lufttemperatur) und die aufsummierte zu prüfende Beobachtungsreihe (Wassertemperatur) gegeneinander im Diagramm aufgetragen. Ergibt sich eine Veränderung des Trends, kann von einer Beeinflussung der Beobachtungsreihe ausgegangen werden. Nach Ausschluss direkter anthropogener Beeinflussungen der Wassertemperatur durch Einleitungen oder andere wasserwirtschaftliche Nutzungen lassen sich ggf. systemische Veränderungen des Energiehaushaltes z. B. durch Umbildung der Ufervegetation identifizieren. Weil solche tiefgreifenden Veränderungen noch nicht stattgefunden haben bzw. homogene Beobachtungsreihen in der erforderlichen Länge nicht vorliegen, ist die Einsatzmöglichkeit der Doppelsummenanalyse begrenzt.

5.2.2 Auswertung der angepassten Winkelfunktionen des Jahresganges

Statistische Ansätze nutzen den mathematischen Zusammenhang zwischen gemessener Lufttemperatur und gemessener Wassertemperatur oder anderer klimatischer Größen. Für alle Messstellen in der Projektdatenbank sind interpolierte Zeitreihen der Lufttemperatur und anderer klimatischer Größen 1981-2003 in täglicher Auflösung vorhanden. Der mittlere Jahresgang der Wassertemperaturen ist ebenfalls in Form der Parameter der angepassten Winkelfunktion in der Datenbank enthalten (vgl. Abschnitt 4.1). Damit ist die Grundlage einer weiterführenden statistischen Auswertung gegeben.

Der Jahresgang der solaren Strahlung folgt dem Sonnenstand und verläuft symmetrisch zu den Sonnenwenden. Die Lufttemperatur zeigt ein Maximum etwa sechs Wochen nach dem Sonnenhöchststand am 21. Juni und ein Minimum entsprechend ca. sechs Wochen nach dem Sonnentiefststand am 21. Dezember. Die thermischen Jahreszeiten beginnen am 1. März (Frühling), 1. Juni (Sommer), 1. September (Herbst) und 1. Dezember (Winter) (FLEMMING 2000). Die Wassertemperatur reagiert stets mit zeitlicher Verzögerung auf die atmosphärischen Bedingungen. Dabei nimmt beim Boden- und Grundwasser und in Standgewässern die Amplitude der Wassertemperatur mit zunehmender Tiefe ab. Die mittlere Freiwassertemperatur ist oft größer als die Lufttemperatur aufgrund der zeitlich verzögerten Abkühlung im Herbst/Winter und der Wirkung der Einstrahlung im Sommer.

Für weiterführende Studien zur Thematik sollte geprüft werden, inwieweit sich die genannten allgemeinen Zusammenhänge zwischen den Jahresgängen der Luft- und Wassertemperatur unter Einbeziehung der Globalstrahlung, die aus der Sonnenscheindauer nach Angström geschätzt werden kann, auswerten lassen. Hierbei sind auch andere Informationen zu nutzen wie u. a. Messtiefe (Boden- und Grundwassertemperaturen), Einzugsgebietsgröße, Durchfluss. Insbesondere wäre die Korrelation zwischen Durchfluss im Fließgewässer und Abweichung der Wassertemperatur vom langjährigen Mittel zu prüfen, weil sich im Zuge des Klimawandels auch die hydrologischen Rahmenbedingungen ändern.

Eine mögliche Vorgehensweise zum Vergleich der angepassten Winkelfunktionen ist in Abbildung 48 skizziert.

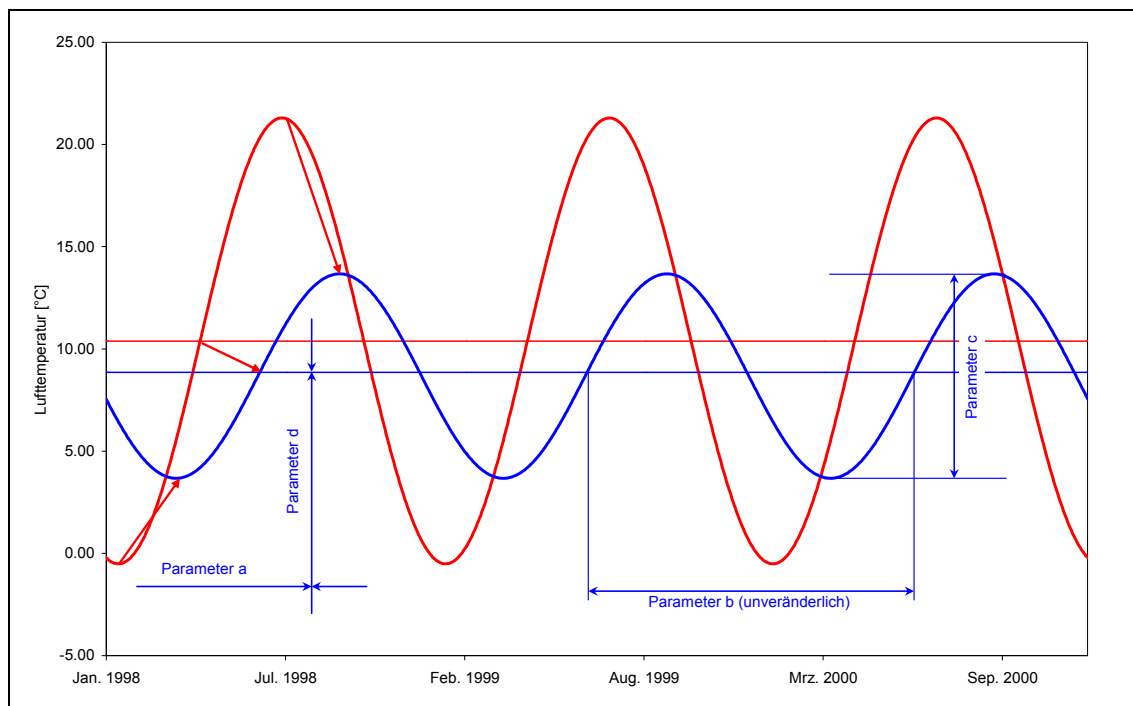


Abbildung 48: Zusammenhang zwischen den mittleren Jahresgängen der Lufttemperatur (rot) und dem mittleren Jahresgang der Wassertemperatur (blau) anhand der Parameter der angepassten Winkelfunktionen

Bei Vorhandensein einer Vielzahl von Messstellendaten kann nach Gesetzmäßigkeiten gesucht werden, welche die Abschätzung der Parameter des Wassertemperaturganges erlauben, so z. B. die zeitliche Verschiebung der Kurven mit zunehmender Messtiefe.

Weiterhin eröffnet die Anwendung der angepassten Winkelfunktionen eine Analyse der Residuen der Luft- und Wassertemperatur, d. h. der Abweichungen der Messwerte vom langjährigen Mittel und eine Suche nach Zusammenhängen zwischen diesen Abweichungen.

Ebenso besteht die Möglichkeit zu prüfen, inwieweit sich die Lufttemperatur und andere Klimagrößen bisher als Folge des Klimawandels verändert haben und wie sich dies auf die Wassertemperatur ausgewirkt hat. Das Ziel besteht in der Abschätzung der zukünftigen Veränderungen der Wassertemperatur als Folge des Klimawandels in Auswertung der bisherigen Veränderungen. Die Anwendung angepasster Winkelfunktionen ermöglicht eine statistische Auswertung der Abweichungen von diesen Winkelfunktionen, welche annähernd normalverteilt sind.

Bei der Auswertung gemessener Temperaturdaten muss die Problematik des Messzeitpunktes bzw. der Mittelwertbildung beachtet werden. So kann die tägliche Amplitude bei Freiwassertemperaturen im Sommer mehrere Grad betragen. Die Berücksichtigung der Uhrzeit ist deshalb bei Einzelmessungen von Bedeutung.

5.2.3 Nichtlineares Regressionsmodell nach MOHSENI & STEFAN (1999)

In der Fachliteratur wird eine Vielzahl von Regressionsmodellen beschrieben. Sie wurden i. d. R. im Rahmen einer entsprechenden regionalen Betrachtung anhand der dort erhobenen Daten aufgestellt und unterscheiden sich hinsichtlich der angewandten Funktionstypen und Parameter. Die Parameter können anhand der in Sachsen gemessenen Temperaturen angepasst werden.

Das nichtlineare Regressionsmodell nach MOHSENI & STEFAN (1999) beschreibt die Abhängigkeit der Wassertemperatur von der Lufttemperatur:

$$WT = \mu + \alpha \cdot (1 + \exp(\gamma \cdot (\beta + T_{\text{air}})))^{-1}$$

| | | |
|-----|------------------|---|
| mit | WT | Wassertemperatur |
| | μ | geschätztes Minimum der Wassertemperatur |
| | α | geschätztes Maximum der Wassertemperatur |
| | β | Wassertemperatur am Wendepunkt der Regressionsbeziehung |
| | γ | Maß für die größte Steigung der Regressionsbeziehung |
| | T_{air} | Lufttemperatur |

Die Regressionsbeziehung beschreibt die Abhängigkeit der Wassertemperatur für längere Zeitschritte, d. h. für Wochen- bis zu Tagesmittelwerte, ist aber auch für kürzere Zeitschritte geeignet.

5.3 Numerische kompartimentbezogene Modelle

5.3.1 Allgemeine Modellansätze

Energiehaushalt einer Landfläche

Von wesentlicher Bedeutung für den Energiehaushalt von Landflächen ist die Strahlungsbilanz. Hier werden kurz- und langwellige Strahlungskomponenten unterschieden. Zu den kurzwelligen Strahlungskomponenten gehören

- die direkte Sonnenstrahlung,
- die diffuse Sonnenstrahlung (Himmelsstrahlung),
- die reflektierte, kurzwellige Strahlung.

Die Reflexion der Sonnenstrahlung wird durch das Reflexionsvermögen (Albedo) bestimmt, welches je nach Eigenschaft der Landoberfläche zwischen ca. 14 % und 30 % liegt.

Zu den langwelligen Strahlungskomponenten gehören

- die zur Erdoberfläche gerichtete Wärmestrahlung der Erdatmosphäre (Gegenstrahlung),
- die von der Erdoberfläche ausgehende Wärmestrahlung (Ausstrahlung),
- die reflektierte langwellige Strahlung.

Die Nettostrahlung (Strahlungsbilanz) resultiert aus der Bilanzierung von Energiezufuhr und -verlust durch die Strahlungskomponenten.

Die Strahlungsenergie wird an der Pflanzen- und Bodenoberfläche umgewandelt. Nur etwa 2 % der kurzwelligen Einstrahlung wird beim Aufbau organischer Substanz durch Photosynthese verbraucht (BAUMGARTNER 1967). Diese Energie wird beim Stoffabbau wieder freigesetzt. Sie ist für den Wärmehaushalt nicht relevant.

Dagegen wird ein wesentlicher Teil der Strahlungsenergie in Wärme umgesetzt. Energiegewinn führt zu einer Erwärmung der Pflanzen- und Bodenoberfläche. Von dieser Wärme wird ein Teil advektiv an die umgebende Luft abgegeben (Strom fühlbarer Wärme). Der Hauptteil der absorbierten Strahlung wird für die Verdunstung von Wasser aufgewendet (Strom latenter Wärme). Ebenso kann Wärme der Landoberfläche advektiv aus der Atmosphäre zugeführt werden und Kondensation von Wasser auf der Landoberfläche führt zu einem Gewinn an latenter Wärme. Darüber hinaus ist der Niederschlag ebenfalls mit einem Wärmeumsatz verbunden.

Letztlich sind für die Landoberfläche Wärmeströme im Boden und seitliche (konvektive) Wärmeströme von Bedeutung.

In einem Waldbestand werden ca. 10 % aus der Nettostrahlung in Boden und Pflanzenmasse umgesetzt, ca. 20...30 % gehen als fühlbare Wärme der Luft in die Atmosphäre, der Hauptteil wird durch Verdunstung verbraucht (BAUMGARTNER 1967). Dabei handelt es sich um ca. 2/3 der Nettostrahlung bei ausreichend verfügbarem Wasser (humides Klima), in ariden Savannen dagegen nur 1/3 und in Wüsten ca. 1/20 und weniger.

Die beschriebenen Teilprozesse von Energiehaushalt und Wärmeströmung können sehr gut in Modellen nachgebildet werden. Die Parameter der zugrundeliegenden Gleichungen sind gut untersucht. Die Modelle sollten allerdings in der Lage sein, die Verdunstung mit einem physikalisch fundierten Ansatz wie dem nach PENMAN-MONTEITH (FAO 1998) zu berechnen, welcher die wesentlichen energetischen Zustandsgrößen berücksichtigt.

Wärmebewegung im Boden- und Grundwasser

Die numerische Modellierung der Wärmebewegung im porösen Medium erfordert die Kenntnis der Wasserbewegung. Deshalb wird die Wärmebewegung üblicherweise nicht eigenständig berechnet, sondern ist Bestandteil von Modellen der Bodenwasser- und Grundwasserströmung. Diese lösen die allgemeine Transportgleichung auf numerischem Wege. Modelle dieser Kategorie lassen sich unterscheiden in

- reine Bodenwassermodelle, =ungesättigte/teilgesättigte Bodensäulen, vereinfachte Berücksichtigung des Grundwasserstandes
- Modelle der ungesättigten und gesättigten porösen Medien (sowohl ungesättigter Boden - Sickerwasserbereich - als auch gesättigter Boden – Grundwasserbereich -)
- reine Grundwassermodelle (ausschließlich Berechnung der Grundwasserströmung)

Allgemeine Transportgleichung

Die allgemeine Transportgleichung ist Grundlage zur Berechnung vieler Transport- und Bewegungsvorgänge, wie die der Wasserbewegung, Wärmebewegung, Diffusion, elektrischer Ladung usw. Sie hat die folgende allgemeine Form:

$$n = -K \cdot \frac{dp}{dx}$$

mit n Stromdichte, Fluss, Filtergeschwindigkeit
 K Leitfähigkeit
 dp/dx Potenzialgradient

Im Fall der Berechnung der Wasserbewegung im porösen Medium entsprechen n der Filtergeschwindigkeit bzw. dem Durchfluss, K der hydraulischen Durchlässigkeit und dp/dx dem hydraulischen Gradienten. Die Transportgleichung ist im Modell mit der Kontinuitätsgleichung verknüpft, welche die Bilanztreue und die Berechnung von Wassermengen und deren Veränderungen ermöglicht.

Die allgemeine Transportgleichung kann weiterhin zur Berechnung der Wärmeleitung angewandt werden, wobei die Wärmeleitfähigkeit als Materialparameter und der Temperaturgradient als treibende Kraft angewandt wird. Bei der zusätzlichen Berücksichtigung der Wasserbewegung beim Wärmetransport wird die Konvektion und Dispersion berechnet.

Konvektion, Diffusion, Dispersion

Die zugrundeliegenden Differentialgleichungen des Wärme-/Energietransports sind den Advektions-Dispersionsgleichungen für den Stofftransport sehr ähnlich. Der Prozess der Wärmeleitung ähnelt hinsichtlich seiner treibenden Kraft und der zu berücksichtigenden Eigenschaften des Mediums der Diffusion:

Temperaturgradient ⇔ Konzentrationsunterschied
 Wärmeleitfähigkeit ⇔ Diffusionskoeffizient

Ebenso kann der Prozess des konvektiven Wärmetransportes mit der Grundwasserströmung mit ähnlichen Gleichungen beschrieben werden wie der konvektive Stofftransport. Der Prozess der Dispersion der Konzentration beim Transport im porösen Medium findet seine Entsprechung im gleichzeitigen Stattfinden des konvektiven Wärmetransports mit dem Grundwasser und der Wärmeleitung durch den Boden. Dabei kann zusätzlich die Abhängigkeit der Dichte des Wassers von der Temperatur bei der Modellierung der Grundwasserströmung berücksichtigt werden, sodass warme Grundwässer im Modell aufsteigen und kalte absteigen. Die Entsprechung der Sorption von Wasserinhaltsstoffen an der Festsubstanz ist die Speicherung von Energie in der Festsubstanz.

Aufgrund der ähnlichen Natur der Differenzialgleichungen für den Stoff- und Wärmetransport sollte jedes Finite-Elemente- bzw. Finite-Differenzen-Modell der Sicker- und Grundwasserströmung erweiterbar sein, sodass die Temperatur modelliert werden kann.

Wärmetransport im Fließgewässer

Fließgewässer stellen komplexe Systeme dar, die durch eine hohe Dynamik und räumliche Variabilität gekennzeichnet sind.

Der Transport sowohl von stofflichen Substanzen als auch von Wärme wird in Fließgewässern durch die Transportgleichung beschrieben. Diese wird z. B. im ATV-Gewässergütemodell in folgender Form angewandt (eindimensionale Advektions-Dispersionsgleichung):

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial c}{\partial x} \cdot \left(A \cdot D \cdot \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{c \cdot F}{A} + \frac{E}{A}$$

mit c = c(x,t) Stoffkonzentration
 u = u(x,t) mittlere Fließgeschwindigkeit
 A = A(x,t) durchströmter Flussquerschnitt
 D = D(A,u,x,t) longitudinaler Dispersionskoeffizient
 E = E(x,t), F = F(x,t) Funktion, abhängig von x und t

Damit wird bei eindimensionaler Modellierung des Fließgewässers auch beim Wärmetransport die longitudinale Dispersion in Fließrichtung berücksichtigt. Während des Wärmetransports sind Wärmeverluste- und -gewinne zu berücksichtigen.

Energiebilanz der Fließgewässer

Hinsichtlich der Energiebilanz der Fließgewässer werden von Modellen folgende Prozesse berücksichtigt:

- Wärmeaustausch durch Strahlung (lang- und kurzwellige Strahlungsbilanz)
- Wärmeübergang über die Wasseroberfläche aufgrund des Temperaturgradienten zur Atmosphäre (Konvektion, fühlbarer Wärmestrom)
- Wärmeverlust (Verdunstung) bzw. Wärmezufuhr (Kondensation) an der Wasseroberfläche bei Phasenübergang aufgrund des Dampfdruckgradienten (latenter Wärmestrom)
- Wärmeaustausch mit dem benetzten Umfang durch Wärmeleitung aufgrund des Temperaturgradienten zum Untergrund
- Wärmeaustausch mit dem Grundwasser durch Konvektion (Grundwasserzutritt/-abfluss)
- Wärmezufuhr durch Zuflüsse (Abfluss von Landflächen, Zufluss aus Teileinzugsgebieten) und Einleitungen (externe Quellen und Senken)
- Wärmezufuhr mit dem direkten Niederschlag
- Wärmegewinn durch innere Reibung und Reibung mit dem Gewässerbett

Für die genannten Prozesse kommen in Modellen mehr oder weniger physikalisch fundierte Ansätze zur Anwendung.

Wärmehaushalt von Standgewässern

Standgewässer sind hinsichtlich des Wärmehaushaltes schon aufgrund ihrer spezifischen geometrischen Form, Größe und hydrologischen Verhältnisse nur sehr eingeschränkt untereinander vergleichbar. Sie lassen sich anhand unterschiedlichster Kriterien kategorisieren, so nach morphologischen Gesichtspunkten (Geomorphologie, Geologie, Morphometrie, Entstehung, Verbreitung), nach Schichtungs- und Mischungstypen, nach ihrem tropischen Zustand und nach ihrer Bewirtschaftung unterteilen. Für die Wassertemperatur von wesentlicher Bedeutung ist die thermische Schichtung.

Im Unterschied zu den Kompartimenten Boden-, Grundwasser und Fließgewässer kann sich in Standgewässern eine saisonale Temperaturschichtung ausbilden. Die Temperatur der Wasser-/Eisoberfläche ändert sich saisonal stark, während sich die Temperatur am Gewässergrund insbesondere bei tiefen Gewässern nur wenig verändert. Mit der Temperatur verändert sich die Dichte des Wassers. Die maximale Dichte ist bei einer Temperatur von 3.98 °C erreicht (Anomalie des Wassers), sowohl wärmeres als auch kälteres Wasser ist leichter. Beim Übergang vom festen zum flüssigen Zustand tritt ein großer Dichtesprung auf, Eis ist deutlich leichter als Wasser. Weiterhin wirkt es isolierend gegenüber den atmosphärischen Bedingungen und behindert eine Durchmischung des Freiwassers an der Oberfläche.

Aufgrund der Erwärmung des Wassers an der Oberfläche entsteht ein Dichtegradient, der nach Einstellung eines stabilen Zustandes zu einer thermischen Schichtung des Gewässers führt. Im Sommer ist die Temperatur an der Oberfläche am größten und die Temperatur am Grund liegt deutlich über 4 °C. Dies führt zu einem stabilen Zustand mit geringer vertikaler Durchmischung (direkte thermische Schichtung, Sommerstagnation). Im Spätherbst und im Frühjahr kommt es zu instabilen Zuständen aufgrund der geringen Temperaturunterschiede zur Wasseroberfläche (Zirkulationsperioden) im Übergang von der bzw. in die wiederum stabile inverse thermische Schichtung im Winter. Seen mit dem beschriebenen thermischen Zyklus werden dimiktische Seen genannt (zwei Zirkulationsperioden).

Während der Sommerstagnation ist an der Oberfläche aufgrund der Durchmischung durch die Wasserbewegung eine warme, thermisch relativ homogen durchmischte Schicht vorhanden (Epilimnion). In der Tiefe schließt sich das kalte, stagnierende Hypolimnion an. Epilimnion und Hypolimnion werden durch eine Zone mit steilem Temperaturgradienten getrennt (Metalimnion, Thermokline).

Die Mächtigkeit der epilimnischen Schicht hängt in Seen zwischen 35-36° N von den Ausmaßen des Gewässers ab (PATALAS 1984 in DOKULIL et al. (2001):

$$E = 4.6 \cdot F^{0.41}$$

mit E Mächtigkeit des Epilimnions
F Mittel aus größter Länge und größter Breite des Gewässers

Die beschriebene Temperaturschichtung kennzeichnet eher flache mitteleuropäische Gewässer vom Flachland bis zum Mittelgebirge. Die Dynamik der thermischen Schichtung von Gewässern anderer Klima- und Höhenzonen und von Gewässern mit thermisch stabilen Tiefenwässern verläuft anders.

5.3.2 Bodenwassermodelle

Die Wärmebewegung im Boden erfolgt nahezu ausschließlich in Form der Prozesse Wärmeleitung und Konvektion. Letztere erfolgt mit den Bewegungen der Medien Bodenwasser und Bodenluft. In physikalisch fundierten Modellen wird die Wärmebewegung als Wärmeleitung und Konvektion mit dem Bodenwasser und z. T. auch mit der Bodenluft nachgebildet. So wird z. B. in CoupModel die Wärmebewegung nach folgender Gleichung nachgebildet:

$$q_h = -k_h \cdot \frac{\delta T}{\delta z} + C_w \cdot T \cdot q_w + L_v \cdot q_v$$

| | | |
|-----|-------|--|
| mit | q_h | Wärmestrom |
| | k_h | Wärmeleitfähigkeit |
| | T | Temperatur |
| | z | Höhe |
| | C_w | Wärmekapazität des Bodenwassers |
| | q_w | Bodenwasserstrom |
| | L_v | latente Wärme beim Phasenübergang Wasser \leftrightarrow Wasserdampf |
| | q_v | Bodenluftstrom |

Der erste Term auf der rechten Seite der Gleichung entspricht der allgemeinen Transportgleichung, d. h. die Wärmebewegung durch Wärmeleitung folgt in Richtung der niedrigeren Temperatur und zwar umso schneller, je größer der Temperaturunterschied ist. Dabei wird der Boden als Ganzes betrachtet, d. h. als poröses Medium mit allen Volumenanteilen Feststoff, Wasser und Bodenluft. Die Wärmeleitung von Böden stellt oft die wesentliche Komponente der Wärmebewegung dar.

Der zweite Term zur Berücksichtigung der Konvektion mit dem Bodenwasser spielt insbesondere dann eine wesentliche Rolle, wenn eine starke Wasserbewegung im Boden stattfindet, z. B. bei Schneeschmelze oder nach Starkniederschlägen und hoher Wasserdurchlässigkeit. Dies ist trotz der insgesamt geringen Fließgeschwindigkeit von Bodenwasser im Vergleich zu freiem Wasser der Fall aufgrund der hohen spezifischen Wärmekapazität von Wasser. Voraussetzung zur Nachbildung der konvektiven Wärmebewegung ist die Kenntnis der Bodenwasserbewegung, welche i. d. R. ebenfalls Ergebnis der Modellrechnung ist.

Der dritte Term berechnet die Wärmebewegung mit dem Bodenluftstrom. Dabei wird i. d. R. davon ausgegangen, dass die Bodenluft wasserdampfgesättigt ist, Temperaturänderungen zu Phasenübergängen des Wassers flüssig - gasförmig führen und damit auch die Verdunstungs- und Kondensationswärme berücksichtigt werden muss. Die Wärmebewegung im Boden durch Konvektion mit der Bodenluft spielt nur eine sehr untergeordnete Rolle und wird in vielen Modellen, so auch in Hydrus-2D, vernachlässigt.

Weiterhin werden von Bodenwassermodellen

- der Einfluss des Bodenwassergehaltes auf die Wärmeleitfähigkeit des Bodens,
- die latente Wärme bei der Veränderung des Aggregationszustandes (Verdunstung, Kondensation, Bodenfrost),
- der Einfluss der Schneedecke auf den Energieumsatz an der Schnee- und Bodenoberfläche, der Wärmekapazität und -leitfähigkeit der Schneedecke,
- der Einfluss der Schneedecke und des Bodenfrostes auf die Bodenwasserdynamik,
- der Einfluss des Bodenfrostes auf die Wärmeleitfähigkeit des Bodens,
- die Temperaturabhängigkeit hydraulischer Eigenschaften (Viskosität des Wassers, Bodenparameter),
- externe Quellen und Senken

berücksichtigt.

Aus der Vorgabe von Randbedingungen (1. Art: Temperatur, 2. Art: Wärmestrom) resultieren Potenzialgradienten, z. B. bei einer eindimensionalen Bodensäule von einer hohen Temperatur an der Bodenoberfläche (obere Modellgrenze) zu einer geringeren Temperatur an der unteren Modellgrenze. Daraus resultiert ein abwärts gerichteter Bodenwärmestrom und die Temperaturen in der Bodensäule nehmen zu.

Die Wärmezufuhr bzw. der Wärmeverlust über die **obere Modellgrenze** wird berechnet unter Berücksichtigung der Lufttemperatur an der Bodenoberfläche, welche oftmals als Ergebnis eines Teilmodells vorliegt (hier u. a. Berücksichtigung der Verdunstungswärme durch Evaporation und Transpiration), unter weiterer Berücksichtigung der Strahlungsbilanz der Bodenoberfläche, die wiederum u. a. abhängig ist von Albedo und Beschattung, und unter Berücksichtigung der Konvektion mit dem Niederschlagswasser. Weiterhin kann die Wärmeleitung zwischen Bodenoberfläche und Schneedecke nachgebildet werden.

Die untere Randbedingung ist i. d. R. schwieriger zu ermitteln. Der Wärmestrom mit der Konvektion des Sickerwassers kann berechnet werden, sofern dieser bekannt ist. Für die Wärmeleitung muss entweder die Temperatur oder der Wärmestrom als Randbedingung vorgegeben werden, eine dieser Größen muss demnach bekannt sein. Bei der vorliegenden Problemstellung der Prognose der Temperatur nach Klimaprojektion sind diese Größen jedoch nicht bekannt, sondern sollen vom Modell berechnet werden. Lösungsansätze wären z. B.:

- Die Grundwassertemperatur als untere Randbedingung wird vorgegeben, falls das Bodenwassermodell bis zur Grundwasseroberfläche reicht.
- Die Grundwassertemperatur kann anhand der mittleren Lufttemperatur geschätzt werden nach umfangreicher statistischer Auswertung der gemessenen Grundwassertemperaturen im Zusammenhang mit der Lufttemperatur. Hier besteht das Problem, dass das Grundwasser, dessen Temperatur an Messstellen erhoben wird, in unterschiedlicher Tiefe beprobt wurde bzw. die Temperatur in unterschiedlicher Tiefe gemessen wurde und die Grundwasserdynamik am jeweiligen Standort der Messstelle das Messergebnis beeinflusst.
- Für die Grundwassertemperatur wird im Allgemeinen angenommen, dass sie etwa der mittleren Lufttemperatur entspricht. Dabei ist jedoch nicht bekannt, wie schnell die Grundwassertemperatur einer langfristigen Veränderung der Lufttemperatur folgt.
- Wenn das Bodenwassermodell nicht bis zur Grundwasseroberfläche reicht, entspricht die Temperatur an der unteren Modellgrenze nicht der Grundwassertemperatur.
- Einige Modelle wie CoupModel verwenden in diesem Fall analytische Berechnungen der Temperatur an der unteren Modellgrenze anhand der Lufttemperatur und deren saisonalen Schwankungen. Es resultiert ein berechneter sinusförmiger Jahresgang an der unteren Modellgrenze. Dieser kann an Messdaten des Ist-Zustandes angepasst und das Modell somit kalibriert werden. Die mit dem kalibrierten Modell für die Klimaprojektion prognostizierte Bodentemperatur ist wiederum nicht nutzbar für Rückschlüsse auf die Grundwassertemperatur, weil die Grundwasseroberfläche tiefer liegt als die untere Modellgrenze und die Wärmebewegung zwischen Modellgrenze und Grundwasseroberfläche nicht berechnet wird.

CANDY

Das am Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH entwickelte Modell CANDY (Carbon and Nitrogen Dynamics) simuliert die Dynamik des Kohlenstoff- und Stickstoffhaushalts im Boden sowie die Bodentemperatur und den Bodenwasserhaushalt als eindimensionale Prozesse. Eine Regionalisierung des Modells erfolgt über eine GIS-Schnittstelle (ArcView). Das Modell wurde ursprünglich zur Simulation von Klimaänderungseffekten auf die Kohlenstoff- und Stickstoffdynamik im Boden sowie auf die Änderung von Bodeneigenschaften in Kombination mit Ertragsmodellen entwickelt.

Das Bodenprofil wird in homogene Schichten von jeweils 10 cm unterteilt. Jede Bodenschicht wird durch die Parameter Trockenrohdichte, Trockensubstanzdichte, permanenter Welkepunkt, Feldkapazität und Feinanteilgehalt (Ton + Feinschluffgehalt) und einem daraus abgeleiteten Versickerungsparameter beschrieben. Gleiche Bodenschichten werden zu Horizonten zusammengefasst. Die Bodenwärmedynamik wird nach dem Modell von SUCKOW (1986) simuliert.

Das CANDY-Modell wurde u. a. bereits im Parthe-Gebiet eingesetzt (HAFERKORN et al. 2003). Hierbei erfolgte auch eine Kopplung mit dem Grundwassermodell PCGEOFIM® (Hydrodynamik).

CoupModel

Das Modell CoupModel (Coupled Heat and Mass Transfer Model for Soil-Plant-Atmosphere Systems) wurde und wird an der Swedish University of Agricultural Sciences mit dem Ziel entwickelt, den Wasser- und Energiehaushalt natürlicher und naturnaher Ökosysteme und deren Stickstoff- und Kohlenstoffflüsse nachzubilden. Für die wesentlichen Grundprozesse werden physikalisch fundierte und dem derzeitigen allgemeinen Wissensstand entsprechende Berechnungsalgorithmen verwendet. Aus diesem Grunde und im Ergebnis der ständigen Weiterentwicklung kann das Modell für eine große Anzahl von Böden bei unterschiedlichster Pflanzenbedeckung angewandt werden. Hinsichtlich der Anwendung in unterschiedlichen geografischen Gebieten mit verschiedenem Klima gibt es keine Einschränkungen.

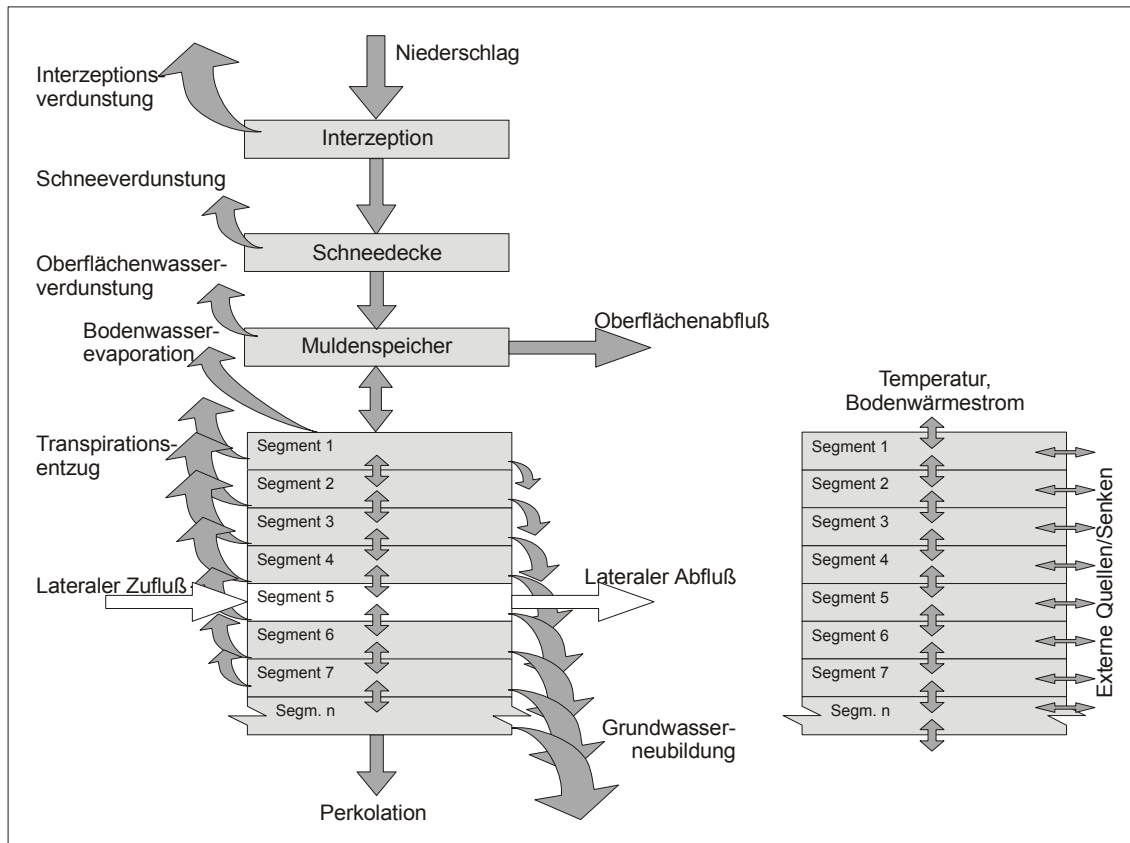


Abbildung 49: Modellschema CoupModel

Die räumliche Grundstruktur entspricht einer eindimensionalen Bodensäule. Die zeitliche Diskretisierung kann beliebig vorgenommen werden (Minutenwerte bis mittlere Monatswerte). Es werden die wasser- und energiehaushaltlichen Grundprozesse wie Schneedynamik, Interzeption, Transpiration, Bodenwasserevaporation, Oberflächenabfluss, Bodenfrostdynamik, Bodenwasser- und Grundwasserdynamik und seitliche Dränabflüsse nachgebildet. Den Kern des Modells stellen die grundlegenden Differentialgleichungen des Energie- und Wasserhaushaltes dar:

- Der Energieerhaltungssatz, die Dynamik des Energiehaushaltes beruht auf den Temperaturgradienten (Gesetz nach Fourier).
- Das Gesetz zur Erhaltung der Masse, die Wasserbewegung wird berechnet auf Grundlage der Potenzialdifferenz (Gesetz nach Darcy, für gesättigte und ungesättigte Bedingungen verallgemeinert durch die Richards-Gleichung).

Wasser- und Energiehaushalt sind miteinander verknüpft.

Hinsichtlich der Teilmodelle wird ein Konzept verfolgt, welches dem Anwender einen maßgebenden Einfluss auf die Modellstruktur ermöglicht. Es werden i. d. R. mehrere Möglichkeiten zur Berechnung von Teilprozessen angeboten, die sich hinsichtlich des Berechnungsansatzes voneinander unterscheiden. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, einzelne Teilprozesse zu übergehen. Der Anwender kann damit eine Modellstruktur wählen, welche die vorhandenen Ausgangsdaten optimal ausschöpft.

Dessen ungeachtet werden Standardmodule und -parameter angeboten, die eine weitreichende Gültigkeit besitzen und mit den üblichen Ausgangsdaten abzuarbeiten sind.

Aufgrund der eindimensionalen Struktur des Modells können Berechnungen lediglich für Teilflächen eines Modellgebietes mit jeweils vergleichbaren Eigenschaften durchgeführt werden (Hydrotope). Wenn der Grundwasserstand dieser Teilflächen vergleichbar ist und die Modelluntergrenze mit der Grundwasseroberfläche hinreichend übereinstimmt, kann mit CoupModel der Input für ein nachgeordnetes Grundwassermodell berechnet werden (Grundwasserneubildung, Temperatur).

CoupModel verwendet eine Fülle an Parametern für unzählige Teilmodule, die zwar eine komplexe Modellierung erlauben, aber auch erhebliche Unsicherheiten hinsichtlich des Modellergebnisses bedingen. Es ist deshalb in jedem Fall erforderlich, das Modell sowohl an der Gras-Referenzverdunstung als auch anhand gemessener Daten von Bodenwassergehalt, Saugspannung, ggf. Sickerwassermengen und Abflussteilgrößen und Bodentemperatur zu kalibrieren.

Hydrus-1D/2D/3D

Das vom U.S. Department of Agriculture in Riverside, California, entwickelte Modell Hydrus-2D erlaubt die Berechnung der zweidimensionalen Wasser-, Wärme- und Stoffbewegung in ungesättigten und gesättigten Böden. Seit einigen Jahren wird an der Überführung in die räumliche Dimension gearbeitet, die seit 2008 als Hydrus-3D erhältlich ist. Der Vorläufer von Hydrus-2D, SWMS, ist Open Source und wird auch noch heute verwendet, z. B. im Modell zur Sickerwasserprognose SiWaPRO DSS der TU Dresden.

Hydrus-2D löst die Richards-Gleichung der Wasserbewegung im gesättigten und ungesättigten porösen Medium und die Konvektions-Dispersions-Gleichung für den Wärme- und Stofftransport. Die Berücksichtigung eines Wasserentzuges durch Pflanzenwurzeln ist möglich. Der Wärmetransport wird ermittelt in Abhängigkeit von der Wärmeleitfähigkeit und der Konvektion mit dem Bodenwasser. Der Stofftransport mit dem Bodenwasser beinhaltet den konvektiv-dispersiven Transport mit dem Bodenwasser ebenso wie die Diffusion in der Bodenluft.

Hydrus-2D erlaubt die Modellierung der Wärmeströmung im ungesättigten und gesättigten Boden. Damit ist die Modellierung der Grundwassertemperatur prinzipiell möglich. Hier sind jedoch folgende Einschränkungen zu nennen:

- Eine Berechnung der dreidimensionalen Grundwasserströmung wie in einem typischen Grundwassermodell ist mit dem 2D-Modell nicht und mit dem 3D-Modell nur sehr eingeschränkt und für vereinfachte Geometrien möglich. Eine solche ist jedoch für den Anwendungsfall der Prognose der Wassertemperatur auch nicht erforderlich (2D-Anstrom zur Vorflut).
- Die Lösung der nichtlinearen Differenzialgleichungen für gesättigte und ungesättigte Bedingungen erfordert einen großen Rechenaufwand, d. h. lange Rechenzeiten. Numerische Instabilitäten, die zu Modellfehlern oder Programmabstürzen führen, treten häufig auf.
- Die Temperatur an der unteren Modellgrenze ist nicht bekannt. Diese Grenze muss deshalb möglichst tief liegen, d. h. weit vom Betrachtungsraum entfernt. Die Temperatur muss als Randbedingung anhand von Messdaten im tieferen Grundwasserleiter bestimmt oder geschätzt werden.
- Eine Modellkalibrierung anhand von Temperaturmessdaten ist erforderlich.

Dessen ungeachtet sollte sich Hydrus-1D oder -2D bei vorwiegend vertikaler Sickerwasserbewegung im Lockergestein gut zur Modellierung der Boden- und Grundwassertemperatur eignen, wenn das Modell vereinfacht in Form einer Bodensäule angewandt wird.

SPRING®

Der Anwendungsbereich des Modells SPRING ist die Modellierung der Grundwasserströmung einschließlich der Grundwassertemperatur. Eine ausführlichere Beschreibung erfolgt deshalb in Abschnitt 5.3.3.

Weitere Bodenmodelle

Modelle, welche den Stoffumsatz von Kohlenstoff und Stickstoff nachbilden, erfordern die Berücksichtigung der Bodentemperatur (LfUG 2008a). In diese Modelle sind i. d. R. einfache stochastische bis physikalisch fundierte Module zur Berechnung des Wärmehaushaltes integriert. Beispiele sind ANIMO, CENTURY oder WHNSIM. Weil die Energieumsätze an der Landoberfläche

zur Berechnung der Verdunstung und der Schneedynamik in Wasserhaushaltmodellen ohnehin berücksichtigt werden müssen und der Wärmestrom im Boden vergleichsweise einfach zu berechnen ist und für die Bodenfrostdynamik bekannt sein muss, erlauben viele Bodenwasserhaushaltmodelle die Berechnung der Bodentemperatur.

5.3.3 Grundwassermodelle

Während Modelle von Wasser-, Wärme- und Stofftransport im ungesättigten und gesättigten Medium wie Hydrus eher für den mikroskaligen Bereich mit Dimensionen im Meter- bis Hektometerbereich konzipiert sind, bilden reine Grundwassermodelle wie Modflow die Grundwasserströmung im mesoskaligen Bereich mit Ausdehnungen von mehreren hundert Metern bis zur Größe kleiner Flusseinzugsgebiete ab. Die Oberflächenprozesse und die Wasserbewegung in der ungesättigten Zone werden von diesen Modellen nicht berechnet, dem Modell wird lediglich die Grundwasserneubildung, der Wasserspiegel in Gewässern und weitere Quellen bzw. Senken als Randbedingung vorgegeben. Die Wasserbewegung im porösen Medium erfolgt entsprechend des Darcy-Gesetzes, einer Anwendung der allgemeinen Transportgleichung:

$$v = -k_f \cdot \text{grad } h$$

| | | |
|-----|-------|------------------------------|
| mit | h | Standrohrspiegelhöhe |
| | k_f | hydraulische Durchlässigkeit |
| | v | Filtergeschwindigkeit |

d. h. die Wasserbewegung erfolgt in Richtung des hydraulischen Gradienten und die Geschwindigkeit ist abhängig vom Gradienten und der Durchlässigkeit des Grundwasserleiters. In Kombination des Darcy-Gesetzes mit der Kontinuitätsgleichung resultiert die Grundwasserströmung als Volumenstrom im Modellkörper.

Das Hauptanwendungsgebiet von Grundwassermodellen ist die Modellierung des Stofftransportes im Grundwasser. Dies folgt im Anschluss an die Modellierung der Grundwasserströmung durch Anwendung der Advektions-Dispersiongleichungen. Es besteht ebenso die Möglichkeit, auf der Grundlage der modellierten Grundwasserströmung die Wärmeausbreitung durch Wärmeleitung und konvektive Wärmebewegung zu berechnen. Dabei werden analog zum Stofftransport die Prozesse Konvektion, Diffusion und Dispersion berücksichtigt.

Hinsichtlich der Modellierung der Grundwassertemperatur besteht bei reinen Grundwassermodellen generell das Problem, dass die Grundwasserneubildung als obere Randbedingung verwendet wird, ohne dass die ungesättigte Bodenzone im Modell berücksichtigt wird. Damit muss nicht nur die Grundwasserneubildungsmenge vorgegeben werden, sondern auch die Temperatur der Grundwasserneubildung. Diese kann nur mit einem Modell für die ungesättigte Zone ermittelt werden. Bei instationären dynamischen Betrachtungen besteht weiterhin die Schwierigkeit, dass der Abstand der Grundwasseroberfläche zur Geländeoberfläche variiert und sich damit auch die Temperatur der Grundwasseroberfläche verändert. Weiterhin sind Grundwassermodelle i. d. R. vertikal nur grob aufgelöst, d. h. die Mächtigkeit der Modellschichten liegt oft im Bereich mehrerer Meter. Daraus resultiert das Erfordernis, den oberflächennahen Grundwasserleiter mit seinen hohen und stark variierenden Temperaturgradienten in mehrere Modellschichten zu unterteilen.

SPRING®

SPRING ist ein ein-, zwei- oder dreidimensionales Finite-Elemente-Grundwasserströmungsmodell mit integriertem Stofftransport- und Wärmetransportmodell. Die ungesättigte Bodenzone kann berücksichtigt werden. Weitere Sonderanwendungen sind die Flutungssimulation von Hohlräumen und die Berechnung der Klufftströmung. Die mathematischen Grundlagen wurden an der Ruhr-Universität Bochum gelegt, bevor die delta h Ingenieurgesellschaft mbH Witten die Strömungs- und Transportmodelle für Anwendungen in der Praxis verfügbar machte (www.delta-h.de). Die Software ist proprietär und kostet derzeit ca. 5.500 €.

Anwendungen der Modellierung des Wärmetransportes sind u. a. Untersuchungen zur geothermischen Nutzung des Grundwassers oder zum Einfluss der Temperaturerhöhung in der Vorflut auf die Temperatur des oberflächennahen Grundwassers (vgl. Abbildung 50 und Abbildung 51). Die Auswirkung der Grundwassertemperatur auf die Sorption von Wasserinhaltsstoffen an der Feststoffmatrix kann berechnet werden. Damit sollte das Modell in der Lage sein, den Einfluss veränderter Lufttemperaturen auf die Temperatur des Grundwassers zu berechnen und ggf. Rückschlüsse auf die Veränderungen der Grundwasserbeschaffenheit zu ziehen.

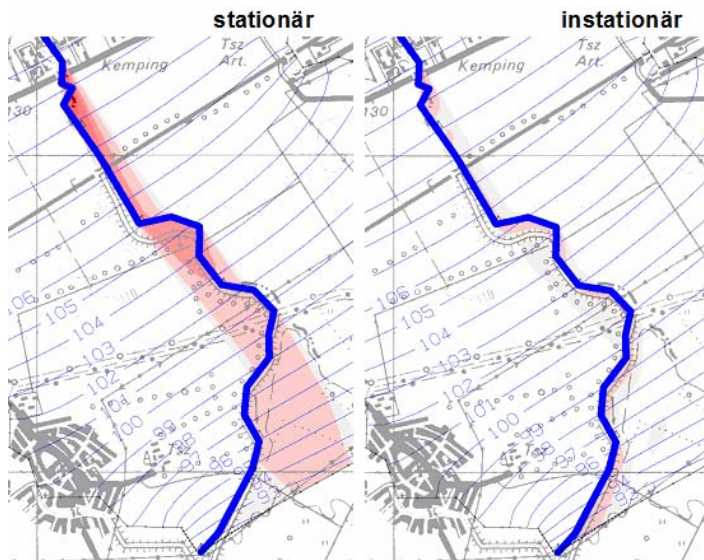


Abbildung 50: Berechnung der Veränderung der Grundwassertemperatur aufgrund der Einleitung warmer Wässer aus geothermischer Nutzung in die Vorflut mit SPRING® (Quelle: www.delta-h.de)

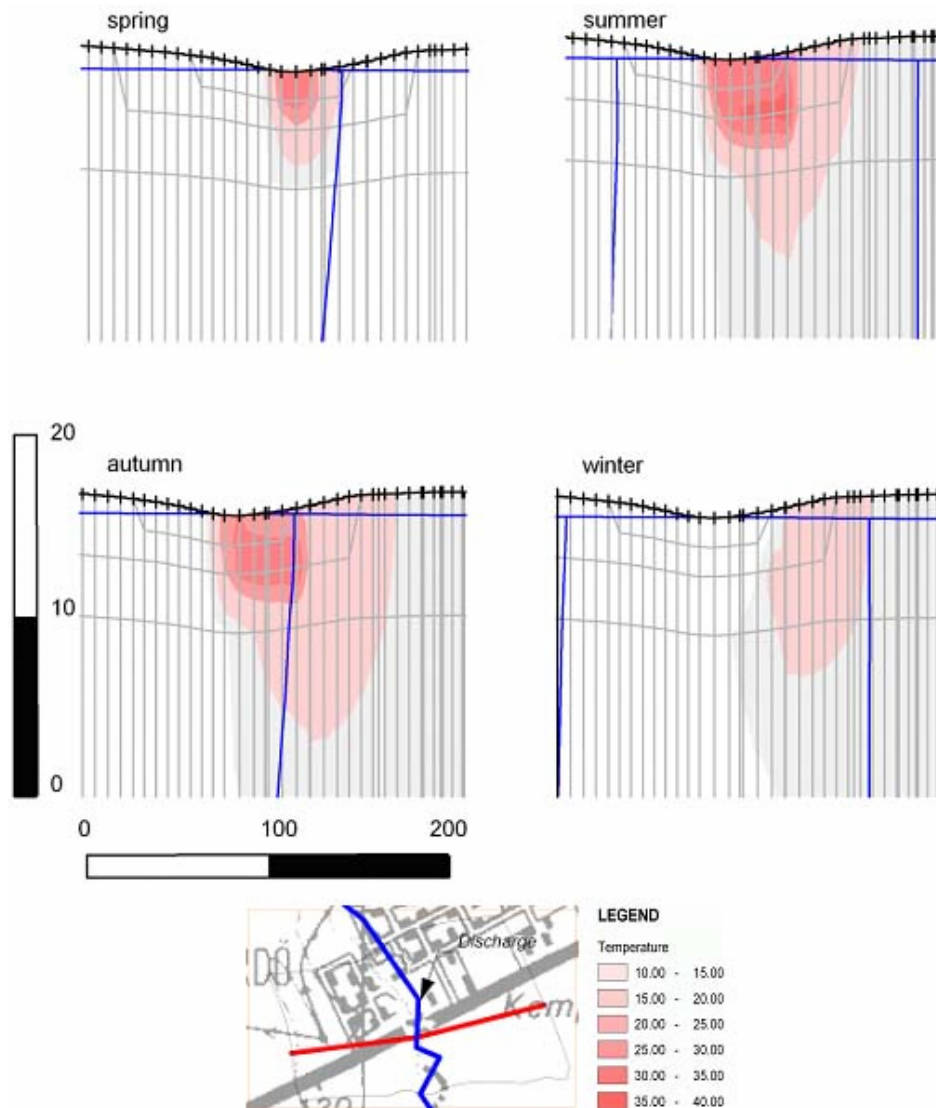


Abbildung 51: Berechnung der Veränderung der Grundwassertemperatur aufgrund der Einleitung warmer Wässer aus geothermischer Nutzung in die Vorflut mit SPRING® (Schnittdarstellung, Quelle: www.delta-h.de)

Als wesentliches Hindernis für die Berechnung der Grundwassertemperatur mit Grundwassermodellen besteht in der fehlenden Berücksichtigung der ungesättigten Zone. Damit müsste den Grundwassermodellen die Temperatur der Grundwasserneubildung vorgegeben werden. In SPRING umgeht man dieses Hindernis durch die explizite Modellierung der ungesättigten Zone.

Modflow

Modflow ist ein verbreitetes Finite-Differenzen-Modellsystem der Grundwasserströmung, welches mit einer Vielzahl von Modulen zur Berechnung des Stofftransportes ergänzt werden kann. Der Quellcode des Strömungsmodells und einiger Transportmodelle ist frei verfügbar, die Dokumentation ebenfalls.

Die Grundwassertemperatur kann mit Modflow in den erhältlichen Varianten nicht berechnet werden. Hinsichtlich der Implementierung der Grundwassertemperatur bestehen folgende Schwierigkeiten:

- Die ungesättigte Zone ist im Modell nicht berücksichtigt. Damit müsste nicht nur die Sickerwassermenge als Randbedingung vorgegeben werden, sondern auch die Temperatur des Sickerwassers. Diese muss mit einem separaten Modell für die ungesättigte Zone, z. B. CoupModel oder Hydrus-2D, berechnet werden. Hier besteht die Schwierigkeit, dass mit den Schwankungen des Grundwasserstandes auch die Temperatur der Grundwasseroberfläche verändert wird, weil sich diese rein räumlich der Bodenoberfläche nähert bzw. sich von dieser entfernt. Dies kann nur durch eine Kopplung von Modflow mit einem Modell der ungesättigten Zone berücksichtigt werden.
- Das Grundwassermodell ist so konzipiert, dass die einzelnen Grundwasserleiter und -stauer üblicherweise als jeweils eine nicht unterteilte und damit teilweise mächtige Modellschicht nachgebildet werden. Die Modellierung der vertikalen Temperaturverteilung erfordert dagegen insbesondere nahe der Geländeoberfläche Schichtmächtigkeiten im Dezimeterbereich.

PCGEOFIM

PCGEOFIM[®] ist ein dreidimensionales Grundwasserströmungs- und Stofftransportmodell der Fa. IBGW Ingenieurbüro für Grundwasser GmbH Leipzig. Es nutzt den Algorithmus der Finite-Volumina und wurde schwerpunktmäßig für die Tagebaukippen und -restseen im Leipziger Raum entwickelt. Neben der numerischen Robustheit des Finite-Volumen-Algorithmus zeichnet es sich durch eine Anzahl spezieller Randbedingungen wie Tagebaurestseen aus.

Im Rahmen des KliWEP-Projektes erfolgte eine Kopplung von PCGEOFIM mit dem hydrologischen Einzugsgebietsmodell WaSiM-ETH mit Anwendung auf das Modellgebiet der Parthe. Es erfolgte eine Kalibrierung der Modelle anhand gemessener Grundwasserstände und Durchflüsse und eine Anwendung auf projizierte Klimadatenreihen auf der Grundlage von WEREX III. Damit liegen für das Einzugsgebiet der Parthe gemessene und prognostizierte Wasserstände und Durchflüsse in hoher zeitlicher Auflösung auf der Basis von WEREX III vor, die ggf. auch im Rahmen des aktuellen Vorhabens genutzt werden können.

PCGEOFIM beherrscht im Gegensatz zu vielen Grundwassermodellen die vereinfachte hydraulische Berechnung des Durchflusses in der Vorflut. Die Geomigration, d. h. die Prozesse Stofftransport, Stoffspeicherung, Stoffaustausch und Stoffumwandlung werden berechnet für

- die mobile wässrige Phase,
- die stagnierende wässrige Phase (am Feststoff gebundenes Grundwasser) und
- die Feststoffphase.

Mit der Konvektion, Diffusion und Dispersion werden auch die grundlegenden Vorgänge des Wärmetransportes berücksichtigt. Dieser wurde jedoch in PCGEOFIM bisher nicht realisiert. Es besteht prinzipiell die Möglichkeit, die Grundwassertemperatur nach entsprechender Modifikation des Modells zu berechnen. Die Modifikation sollte vom Modellautor vorgenommen werden. Damit besteht ggf. auch die Möglichkeit, eine Interaktion mit dem Oberflächenwasser nachzubilden. Die prinzipielle Schwierigkeit besteht darin, dass die Bewegung des Sickerwassers im ungesättigten Bereich im Grundwassermodell nicht nachgebildet wird, d. h. die Grundwasserneubildung wird als Randbedingung unmittelbar dem obersten Grundwasserleiter zugewiesen. Damit muss auch die Temperatur der Grundwasserneubildung, d. h. die Sickerwassertemperatur am Ort des Kapillarsaumes, bekannt sein. Eine weitere Schwierigkeit resultiert aus der relativ groben räumlichen Diskretisierung in Volumenelemente, die bei Betrachtung von Problemen der Grundwasserströmung oft mehrere Meter mächtig sind. Um die vertikale Temperaturverteilung berechnen zu können, wäre eine deutlich feinere Diskretisierung der oberflächennahen Modellschichten erforderlich. Dies

steht dem allgemeinen Vorgehen bei der Mengenströmung entgegen, nach dem bisher ganze Grundwasserleiter und -stauer als nicht weiter unterteilte Modellschicht nachgebildet werden.

5.3.4 Fließgewässermodelle

ATV-Gewässergütemodell

Das ATV-Gewässergütemodell dient der Modellierung der Gewässergüte von Fließgewässern. Es wurde als ein Werkzeug zur Umsetzung der WRRL entwickelt. Einsatzgebiete sind u. a. die Daten- und Systemanalyse, die Maßnahmenplanung und Wirkungsanalyse im Sinne der WRRL oder die Untersuchung von Systemveränderungen.

Es handelt sich um ein komplexes deterministisches Modell, in dem die wesentlichen in einem Fließgewässer ablaufenden physikalisch-chemischen und biologischen Prozesse hinreichend detailliert abgebildet werden. Für stehende Gewässer mit geschichtetem Wasserkörper ist das Modell nicht einsetzbar.

Die Abfluss- und Transportsimulation erfolgt eindimensional. Der Abfluss wird vereinfacht als ausschließlich strömend berechnet. Einleitungen und Nebenflüsse werden am Einleitungspunkt als homogen eingemischt angenommen.

Zeitliche Diskretisierung

Die Berechnung erfolgt stationär, instationär bis stark instationär (Stoßbelastung). Die instationäre Berechnung kann mit beliebiger Zeitschrittlänge und variablen Inputdaten vorgenommen werden.

Räumliche Diskretisierung

Das Gewässersystem besteht aus Flussstrecken, die untereinander und mit der Umgebung durch Knoten gekoppelt werden. Die Flussstrecken werden durch ein Gerinneprofil (Querschnittsprofil) charakterisiert. Es können exakt vermessene Profile als Modellinput verwendet werden. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit der Vereinfachung von Profilen.

Module

Die **Abflusssimulation** bildet eine eigene Einheit. Sie beruht auf der numerischen Lösung der Saint-Venant-Gleichungen, die auch bei der Wasserspiegellagenberechnung in Vorflutern eingesetzt werden. Es können sowohl stationäre als auch instationäre Strömungen in vernetzten, verzweigten und unverzweigten Flusssystemen berechnet werden. Das Ziel der Berechnung besteht in der Ermittlung von Wasserstand und Fließgeschwindigkeit aus dem Durchfluss. Die Berechnung erfolgt eindimensional, d. h. für jede Flussstrecke liegen im Ergebnis eine mittlere Wassertiefe und eine mittlere Fließgeschwindigkeit vor.

Für jedes Zeitintervall wird zunächst der Abfluss im gesamten Flusssystem simuliert. Zusätzlich werden in diesem Modul auch die übrigen hydraulischen Parameter zur Verwendung in den verschiedenen Gütebausteinen ermittelt.

Die **Transport- und Umsetzungsprozesse**, die im Modell berücksichtigt werden können, sind entsprechend ihrer physikalischen, chemischen oder biologischen Natur in Form von getrennten Teilmodulen, sogenannten Bausteinen, organisiert. Die 17 Bausteine des Modells bilden die Einheiten seiner modularen Struktur. Für die Berechnung der Wassertemperatur wesentlich sind die Bausteine 1 (Berechnung der Strahlungsintensität an der Wasseroberfläche und im Wasserkörper) und 2 (Berechnung der Gewässertemperatur). Die Transport- und Umsetzungsprozesse werden getrennt für jede Teilstrecke des Flusssystems gerechnet.

Zur Lösung der Transportgleichung wird ein Charakteristikenverfahren verwendet, dessen Ergebnisse nahezu frei von numerischer Dämpfung sind. Es ist damit speziell für stark dynamische Verhältnisse wie z. B. Stoßbelastungen geeignet. Die transportierten Stoffkonzentrationen werden zur Massenerhaltung vollständig dem oberstromigen Rand der nachfolgenden Flussstrecke übergeben oder bei Zusammenflüssen per Mischungsrechnung eingearbeitet.

Der Transport von Wärmeenergie wird analog zum Transport chemischer Komponenten mittels Anwendung einer verbreiteten Form der Transportgleichung berechnet.

Kombination von Modulen

Das Programm des ATV-Gewässergütemodells bietet grundsätzlich die Möglichkeit, je nach Fragestellung und nach Datenverfügbarkeit ein optimal den gegebenen Verhältnissen angepasstes Modell zusammenzustellen. Weil die Bausteine des Moduls der Transport- und Umsetzungsprozesse zum Teil hochgradig miteinander vernetzt sind, ist eine beliebige Kombination nicht möglich. Daher werden dem Anwender eine Anzahl zulässiger Kombinationen zur Auswahl angeboten. Zur Modellierung der Gewässertemperatur ist die Kombination D0 vorgesehen: Baustein 0 (Abfluss) + 1 (Strahlung) + 2 (Temperatur). Zum Modellaufbau ist zunächst der Abfluss zu berechnen und anhand von Messdaten zu kalibrieren (Baustein 0). Ist eine erfolgreiche Kalibrierung erfolgt, wird im nächsten Schritt die Strahlungsberechnung aktiviert (Baustein 1) und auf Plausibilität geprüft bzw. mittels Messdaten geeicht. Im letzten Schritt wird die Temperaturberechnung aktiviert (Baustein 2). Auch die Temperaturberechnung ist auf Plausibilität zu prüfen und zu eichen.

Modul Abfluss

Die Berechnung von Wasserstand und Fließgeschwindigkeit kann ohne oder mit der Berechnung der kritischen Schubspannungsgeschwindigkeiten erfolgen. Die Möglichkeiten der Berechnungen werden Optionen genannt. Werden die kritischen Schubspannungsgeschwindigkeiten überschritten, erfolgt ein Übertritt von Stoffen aus dem Sediment in die fließende Welle.

Die Abarbeitung des Moduls erfordert den Input der Querprofildaten und Rauigkeitsbeiwerte zur Beschreibung des Gewässerbetts für jede Flussstrecke und des Durchflusses für jeden Knotenpunkt und jede Einleitung.

Modul Transport - Baustein 1 (Strahlung)

Die Strahlung bestimmt die Gewässertemperatur, -beschaffenheit und -biologie in wesentlichem Maße und wird deshalb im Modell detailliert nachgebildet. Daraus resultiert ein hoher Aufwand bei der Beschaffung von Inputdaten und der Parametrisierung. In den Baustein sind alle energetischen Austauschprozesse mit der Atmosphäre und über das Gewässerbett integriert.

Der Baustein 1 kann mit unterschiedlichen Optionen durchgeführt werden:

| | |
|---|--|
| Strahlungsextinktion mit Wassertiefe konstant/variabel/variabel mit hohen Verweilzeiten | Die Strahlung im Wasserkörper entspricht der auffallenden Einstrahlung, die nach Reduktion durch Horizontabschirmung und Beschattung sowie nach Reflexion an der Wasseroberfläche errechnet wurde. In Sonderfällen, z. B. bei sehr geringen Fließgeschwindigkeiten, nimmt die Strahlung mit zunehmender Tiefe ab (Option „variabel“). |
| Beschattungseinfluss | Der Einfluss der Beschattung kann ignoriert oder berücksichtigt werden. Mit Zielstellung der Modellierung der Wassertemperatur sollte der Beschattungseinfluss berücksichtigt werden. |
| Verdunstungs- und Kondensationsberechnung | Die Berechnung erfolgt entweder - über die Differenz zwischen dem Partialdruck des Wasserdampfs in der Atmosphäre und dem Wasserdampfdruck an der Wasseroberfläche - über die Differenz der Wasserdampfgehalte in der Atmosphäre und unmittelbar über der Wasseroberfläche Der Unterschied zwischen den Verfahren ist gering. |
| Gleichgewichtstemperatur | Die Gleichgewichtstemperatur kann berechnet oder nicht berechnet werden. Es handelt sich um eine Zusatzinformation zur Plausibilitätsprüfung, die im Berechnungsalgorithmus nicht weiterverwendet wird. |
| Luftfeuchtigkeit | Es kann die Luftfeuchtigkeit als relative Luftfeuchtigkeit oder als Temperatur am feuchten Thermometer als Input verwendet werden. |
| Wetterdaten | Wetterdaten können konstant (stationäre Berechnung) oder dynamisch vorgegeben werden. |

Die Strahlung wird auf Grundlage der extraterrestrischen Strahlung, welche lediglich von der Zeit (Jahres- und Tageszeit) und dem Ort (geografische Breite) abhängt, und der Wetterdaten berücksichtigt. Diese umfassen:

- Lufttemperatur
- Luftfeuchte
- Luftdruck
- Windgeschwindigkeit

- Bewölkungsgrad
- Wolkentyp (ohne, Cirrus, Cirrostratus, Altostratus, Stratocumulus, Cumulonimbus u. a.)

Die Datenanforderung umfasst den Wolkentyp. Dabei handelt es sich nicht um eine standardmäßige meteorologische Information, wie sie für vergleichbare Modelle normalerweise erforderlich sind. Der Wolkentyp wird zwar vom DWD erfasst, aber nur auf explizite Nachfrage als Zeitreihe bereitgestellt. Diese Information fehlt im Datenspektrum der Klimaprojektion. Aufgrund der Verwendung des Wolkentyps als Inputgröße ist die Anwendbarkeit des Modells eingeschränkt.

Für das Gewässer wird die direkte und diffuse kurzweilige Einstrahlung berechnet. Die Rückstrahlung (Albedo) wird in jahres- und tageszeitlicher Abhängigkeit vom Sonnenstand und vom Bewölkungsgrad berechnet.

Die Wirkung der Beschattung wird differenziert nach vorgegebenen Typen der Ufervegetation. Durch diese Typen werden zugleich die zur Berechnung benötigten Abmessungen wie Uferabstand, Höhe und ggf. Kronenbreite festgelegt. Die Angaben beziehen sich auf Gewässerabschnitte getrennt für linkes und rechtes Ufer und gelten im statistischen Sinne als repräsentativ für die gewählten Strecken.

In einem zweiten Berechnungsteil wird die Verteilung der Strahlung im vertikalen Profil des Wasserkörpers berechnet unter Berücksichtigung der Abschwächung der Strahlung durch die gelösten und partikulären Wasserinhaltsstoffe, des Phytoplanktons und der gelösten organischen Substanzen. Anschließend werden die Glieder der Wärmebilanz als Grundlage für die Berechnung der Gewässertemperatur bestimmt.

Der Wärmehaushalt wird ebenso wie der Stoffhaushalt über eine Bilanzgleichung simuliert. In dieser Gleichung werden alle wesentlichen Energiekomponenten berücksichtigt:

- Dispersion
- Wärmeaustausch durch Strahlung
 - = auf die Wasseroberfläche auftretende Globalstrahlung
 - Wärmeabstrahlung von der Wasseroberfläche
 - + Wärmeeinstrahlung der Atmosphäre (Gegenstrahlung)
 - + Rückstrahlung von der Gewässersohle
- Wärmeaustausch mit dem benetzten Umfang
 - durch Berücksichtigung der Reflexion kurzweiliger Strahlungen am Gewässergrund
 - ⇒ Strahlungsverlust an die Atmosphäre
 - ⇒ Erwärmung des Gewässers
 - durch Berücksichtigung der Aufwärmung des Gewässergrundes durch Einstrahlung
 - durch Berücksichtigung des Wärmestromes zwischen Wasser und Gewässerbett aufgrund des Temperaturgradienten
- Wärmeaustausch mit dem Grundwasser
- Wärmeaustausch durch Verdunstung (Wärmeverlust)
- Wärmeaustausch durch Kondensation (Wärmezufuhr)

Verdunstung und Kondensation werden ermittelt anhand des Unterschiedes des Dampfdruckes an der Phasengrenze Wasser/Luft und der temperaturabhängige Sättigungsdampfdruck des Wassers. Zur Anwendung kommen empirische Gleichungen, die Windgeschwindigkeit wird explizit berücksichtigt.
- Wärmeaustausch durch Konvektion (fühlbare Wärme; =Wärmeübergang von der Wasseroberfläche in die Luft in Abhängigkeit vom Temperaturgradienten unter Berücksichtigung der Windgeschwindigkeit)

Aus den Komponenten der Wärmebilanz errechnet sich schließlich die Nettostrahlung, die als maßgebliche Größe der Wärmelastrechnung an den Temperaturbaustein übergeben wird.

Baustein 2 - Temperatur

Die Temperaturberechnung beruht auf der im Strahlungsbaustein ermittelten Globalstrahlung. Es besteht auch die Möglichkeit, Messdaten zu verwenden. Hier sind die lokalklimatischen Bedingungen von Flussniederungen im Unterschied zum Standort der Wetterstation zu berücksichtigen.

Zusätzlich zu den im Baustein Strahlung berücksichtigten Parametern wird die Temperatur der Einleitungen berücksichtigt. Diese können als Zeitreihen vorgegeben werden. Am Punkt der Einleitung kommt die Mischungsregel zur Anwendung, die resultierende Temperatur bezieht sich auf den gesamten Gewässerquerschnitt. Damit sind mit dem ATV-Gewässergütemodell Wärmelastrechnungen, wie sie z. B. für die Standortplanung von Wärmekraftwerken angewendet werden, möglich.

Die Wassertemperatur kann als Tagesmittelwert oder in höherer zeitlicher Auflösung berechnet werden.

Probleme:

- Wolkentyp als Input, aber eher unkritisch, weil auch gemessene Globalstrahlung zur Temperatursimulation verwendet werden kann (Bewölkungstyp wird nur für die atmosphärische Gegenstrahlung verwendet)
- hoher Aufwand
- Modell ist konzipiert für Berechnungen auf Basis des Tagesganges.
- Instationäre Berechnung schwierig: Durchflüsse müssen bekannt sein für jede Einleitung und jeden Abschnitt (aber Parthe: Daten vorhanden).
- Eisführung/-bedeckung wird nicht berücksichtigt.
- Die Dokumentation ist nicht bis ins Detail erschöpfend, so ist nicht zu erfahren, wie die Grundwassertemperatur berücksichtigt wird und wie die Temperatur bzw. Wärmekapazität des Untergrundes.

SOBEK

SOBEK ist ein Softwarepaket zur Simulation von Prozessen in Einzugsgebieten und deren Fließgewässern, d. h. in Flüssen, Flussmündungen, Kanälen oder Kanalnetzen. Die Einsatzgebiete sind:

- Hochwasservorhersage
- Optimierung von Entwässerungssystemen
- Kontrolle von Bewässerungssystemen
- Kanalbemessung
- Grundwasserstandskontrolle
- Flussmorphologie
- Salzeintrag
- Oberflächenwasserbeschaffenheit im Gewässer

Das Modellsystem wird entwickelt und vertrieben von der Fa. Delft Hydraulics Software, Rotterdamseweg 185, 2628 AR Delft, Niederlande in Zusammenarbeit mit öffentlichen und kommerziellen Partnern (<http://delftsoftware.wldelft.nl>). Es ist in drei unterschiedlichen Varianten (Produktlinien) erhältlich:

- River: eindimensionale Modellierung von Wasserstand und Fließgeschwindigkeit, Sedimenttransport und Wasserqualität
- Lowlands (Rural): beinhaltet zusätzlich die zweidimensionale Modellierung der Abflussbildung im Einzugsgebiet und der Wasserqualität
- Urban: ohne Wasserqualität, nur Entwässerung urbaner Räume

Die Modellvarianten setzen sich aus Modulen zusammen, welche miteinander kombiniert oder eigenständig verwendet werden können. Das Programmsystem besitzt Schnittstellen zu GIS-Anwendungen. Für die Problematik der Berechnung der Wassertemperatur ist die Variante River anwendbar.

Die Software wird kommerziell vertrieben und kostet in Einzelplatzlizenz 5.850 €. Die Dokumentation ist frei erhältlich (http://delftsoftware.wldelft.nl/index.php?option=com_docman&Itemid=61) Der Schwerpunkt des Programmpaketes liegt eher in der Hydraulik und Hydrologie, das Modell ist ausdrücklich zur Niedrigwasser- und Hochwasserbemessung geeignet, beinhaltet ein Niederschlag-Abfluss-Modell und die Wasserspiegellagenberechnung trennt strömenden und schließenden Abfluss.

Für SOBEK wurden zwei Module entwickelt (TEMPER & HEATBAL, PENAILILLO et al. 2008 in IKSR [2009]), welche die Wassertemperatur für Flusstränge wie z. B. den Rhein berechnen können.

Probleme:

- Anschaffungskosten
- Schwerpunkt liegt bei der Hydraulik

Delft3D

Über das Anwendungsgebiet von SOBEK hinaus ist Delft3D in der Lage, die Konvektion von Wasser aufgrund temperaturabhängiger Dichteunterschiede dreidimensional zu berechnen. Die Software wird ebenfalls bei Delft Hydraulics Software entwickelt und ist proprietär. Die Dokumentation ist frei erhältlich

(http://delftsoftware.wldelft.nl/index.php?option=com_docman&task=cat_view&gid=39&Itemid=61).

WET-Temp

WET-Temp (Watershed Evaluation Tool-Temperature) ist ein Modell, welches am Department of Biological and Ecological Engineering, Oregon State University, 116 Gilmore Hall, Corvallis, OR 97331, USA entwickelt wurde. Es ist beim Modellautor als Quellcode in C++ frei erhältlich (Matthew M. Cox, mattcox4@gmail.com). Eine Dokumentation fehlt bislang. Es handelt sich um eine Anwendung, die allein das Ziel hat, die Wassertemperatur in Fließgewässern zu modellieren. Bei der Modellentwicklung wurde insbesondere deren Netzwerkcharakter betont. Untersuchungsgegenstand sind kleine Einzugsgebiete, für die außer der Wassertemperatur und allgemeiner topografischer Informationen keine weiteren Daten vorliegen.

Das Modell ist physikalisch basiert. Betrachtet werden Fließgewässerabschnitte, deren Datensätze die Vegetation, die Lage im Vorfluternetz, die Geländehöhen, Durchflüsse und Querprofile beschreiben. Die geometrische Lage des Gewässerbetts und der Auenbereiche zur Sonne wird berücksichtigt in Verbindung mit der Lufttemperatur, der Luftfeuchte und der Windgeschwindigkeit, um die Energiebilanz des Gewässers zu berechnen. Dabei werden verschiedene Prozesse, die mit Wärmeverlust bzw. -gewinn verbunden sind, wie kurz- und langwellige Ein- und Ausstrahlung, Verdunstung, Konvektion und Advektion nachgebildet. Das Modell beschreibt die tägliche Temperaturdynamik der Gewässerabschnitte im Netzwerk.

Im Anwendungsbeispiel, an welchem das Modell entwickelt wurde, konnte eine Differenz zwischen Messwerten und Modellergebnissen von weniger als 0.3 K erreicht werden. Bei der Anwendung im benachbarten Einzugsgebiet betrug der Unterschied 1.0 K oder weniger. Eine Kalibrierung anhand gemessener Wassertemperaturen ist unerlässlich.

Das Modell ist wenig und ausschließlich in Nordamerika verbreitet, wurde dort allerdings bereits zur Untersuchung des Einflusses des Klimawandels auf die Wassertemperatur herangezogen. Dabei besteht neben der Eingabe der veränderten Klimadaten die Möglichkeit, Veränderungen der Ufervegetation zu berücksichtigen.

Probleme:

- Entwicklung und Verbreitung in USA; die Strahlungsverhältnisse sind wesentlich für die Energiebilanz, so stellt sich die Frage nach der Übertragbarkeit auf mitteleuropäische geografische Breite.
- Es wird die Tagesdynamik der Wassertemperatur berechnet.
- Die Hydraulik (Wasserstand, Fließgeschwindigkeit) wird ggf. nur ungenügend berücksichtigt.
- Die Berechnung erfolgt für konstante Durchflüsse, keine Zeitreihenbetrachtung möglich.
- Das Modell ist kaum und nur in Nordamerika verbreitet, bisher kaum weitere Anwendungen nach der Modellentwicklung.
- Die Entwicklung ruht seit mehreren Jahren.
- Es fehlt eine Modelldokumentation.

AQUASIM

AQUASIM wird von der Abteilung Systemanalyse und Modellierung (SIAM) Dübendorf/Schweiz des Eawag Forschungsinstituts der Eidgenössischen Technischen Hochschulen seit den 1990er-Jahren vornehmlich für den internen Gebrauch in der Forschung entwickelt, kann aber auch für andere Anwendungen erworben werden. Die Dokumentation ist frei verfügbar (<http://www.eawag.ch/organisation/abteilungen/siam/software/aquasim/index>). Zur kommerziellen Nutzung des Programms außerhalb des SIAM-Instituts ist dies käuflich zu erwerben, die Kosten betragen ca. 1.600 €. Die Software beinhaltet ein Benut-

zerhandbuch und eine ausführliche Dokumentation. Darüber hinaus wird keine Unterstützung des Anwenders (Support) angeboten.

Das Modell ist räumlich in Kompartimente unterteilt, die untereinander verbunden sind (Links). Neben der Simulation von Reaktionsgefäßen und Bodensäulen im Labormaßstab ist die eindimensionale Berechnung für Flussabschnitte, die miteinander vernetzt sind, und für die eindimensionale Wassersäule von Seen unter Berücksichtigung der limnologischen Schichtung möglich.

Die Berechnung für Flussabschnitte umfasst

- die Hydraulik (Saint-Venant-Gleichungen),
- den advektiv-dispersiven Transport gelöster oder ungelöster Stoffe,
- den Stoffaustausch zwischen Wasser und Sediment,
- die Stoffumsatzprozesse im Wasser und Sediment,

wobei der Durchfluss konstant bleiben muss. Es werden keine Energie- oder Wärmebilanzen beachtet, die Temperatur ist Inputparameter.

Die Berechnung für Seen umfasst

- die Schichtung der Wassersäule,
- die vertikale Durchmischung und Advektion von gelösten oder ungelösten Inhaltsstoffen,
- die Sedimentation von Partikeln,
- den Austausch von gelösten Stoffen zwischen der Wassersäule und dem Porenraum des Sediments,
- den advektiven und diffusiven Austausch zwischen einer Anzahl von Sedimentschichten,
- die Stoffumbauprozesse in der Wassersäule und im Sediment,

wobei der See nicht mit anderen Kompartimenten wie Flussabschnitten verbunden, also nur eigenständig betrachtet werden kann. Auch hier werden keine Energie- oder Wärmebilanzen berechnet und die Wassertemperatur muss dem Schichtenprofil des Sees vorgegeben werden.

Ein Modell kann zunächst in stark vereinfachter Form aufgebaut und später präzisiert werden. Es besteht die Möglichkeit der Verwendung mehrerer Berechnungsansätze, um Unsicherheiten hinsichtlich der Belastbarkeit des Ergebnisses zu quantifizieren. AQUASIM erlaubt die inverse Modellierung zur Parameterbestimmung anhand von Messdaten. Weil das Modell keine Berechnung des Wärmetransportes erlaubt, ist es im Rahmen des Projektes nicht nutzbar. Im Rahmen einer Dissertation wurde ein Wärmehaushaltmodell für Bergbäche in AQUASIM integriert (Modellierung der Auswirkungen von Wasserkraftanlagen auf physikalische und chemische Eigenschaften von Bergbächen - Dissertation ETH ZÜRICH 2002).

CE-QUAL-W2

Das Modellsystem CE-QUAL-W2 wird in Zusammenarbeit der Portland State University, Oregon, und der Waterways Experiment Station des U.S. Army Corps of Engineers, Vicksburg, Mississippi, seit 1975 entwickelt. Es erlaubt die physikalisch fundierte Modellierung der Hydrodynamik einschließlich der Wassertemperatur und der Wasserqualität in Flüssen, Seen, Speicherbecken, Flussmündungen und Kombinationen aus solchen. Der Quellcode des Modells wurde in FORTRAN 90/95 geschrieben und ist frei verfügbar (<http://www.ce.pdx.edu/w2/>). Er kann somit beliebig verändert oder erweitert werden. Entsprechende FORTRAN-Compiler sind ebenfalls als freie Software erhältlich (General Public License). Die vollständige Dokumentation des Modells und der Modellsoftware wird ebenfalls frei verteilt.

Die räumliche Modellstruktur von CE-QUAL-W2 besteht aus zweidimensionalen vertikalen Finite-Elemente-Schnitten, die längs in Fließrichtung durch die Gewässer verlaufen (Abbildung 52, jedes Segment wird durch einen vertikalen Finite-Elemente-Modellschnitt in Fließrichtung und die Gewässerbreite repräsentiert).

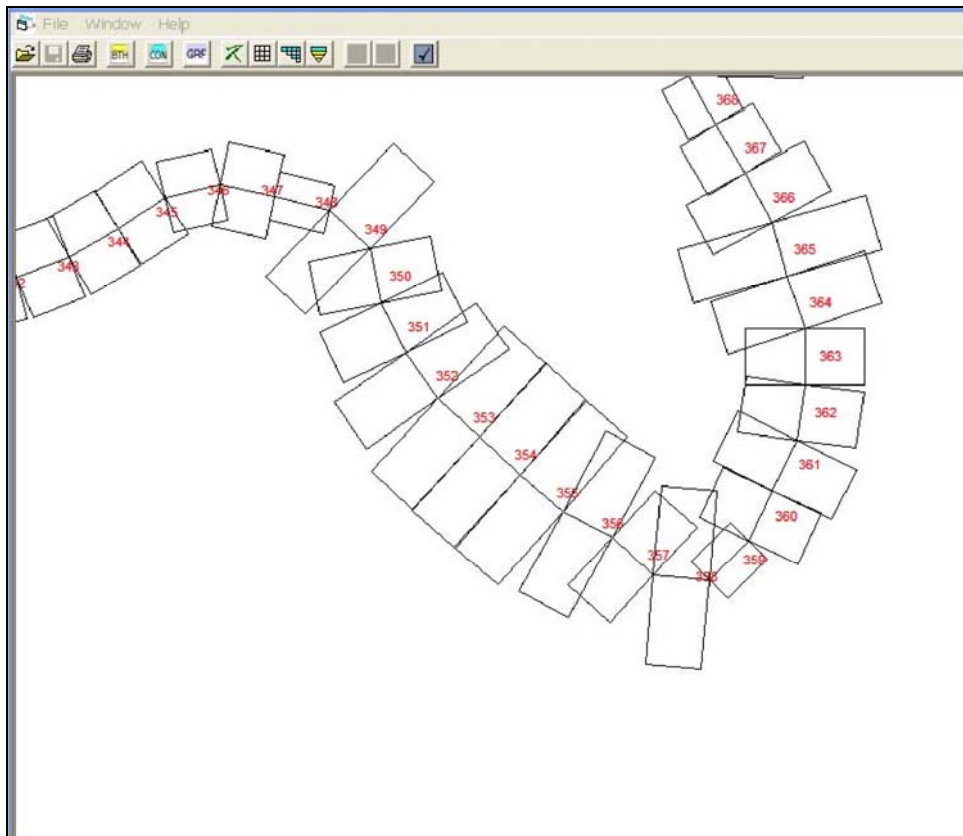


Abbildung 52: Räumliche Diskretisierung eines Fließgewässerabschnittes in Segmente (COLE & WELLS 2008)

Dabei werden die Gewässerzustände wie Wasserstand, Temperatur und Beschaffenheit über den Fließquerschnitt gemittelt, d. h. die räumliche Betrachtung ist eindimensional, sodass Aussagen über die Verteilung über den Gewässerquerschnitt nicht möglich sind. Die Modellschnitte erlauben Aussagen über den mittleren Zustand an beliebigen Gewässerstationen (x-Koordinate: Fließrichtung) und Tiefen im Gewässer (y-Koordinate). Mit den Modellschnitten kann ein Gewässernetz nachgebildet werden, Modellschnitte von Nebenflüssen können in Fließgewässer münden, diese wiederum weiter in Hauptflüsse, Seen, Speicherräume oder Mündungstrichter am Meer. Es bestehen keine Beschränkungen hinsichtlich der Anzahl der Gewässerelemente. Randbedingungen sind als Quellen, Flussmündungen oder als Zu- und Abströme an Fließquerschnitten definierbar.

Das Modell erlaubt sowohl instationäre Berechnungen über kurze Zeiträume als auch langfristige instationäre Berechnungen zur Entwicklung von Durchfluss, Temperatur und Wasserqualität. Damit ist eine wesentliche Voraussetzung zur Modellierung der Wassertemperatur unter veränderten klimatischen Bedingungen gegeben.

CE-QUAL-W2 besteht aus den Schwerpunkten Hydrodynamik und Wasserqualität. Die Hydrodynamik umfasst die Berechnung des Wasserstandes (Wasserspiegellage), von Fließgeschwindigkeit bzw. Durchfluss und der Wassertemperatur. Letztere ist Bestandteil des Schwerpunktes Hydrodynamik, weil diese von der temperaturabhängigen Dichte des Wassers abhängt. Der Schwerpunkt Wasserqualität erlaubt Berechnungen zur Gewässerbiologie (Colibakterien, Phyto- und Zooplankton) und Gewässerchemie (Stoffkonzentrationen, pH-Wert, Sauerstoffgehalt u. a.). Es können mehr als 60 Stoffe berücksichtigt werden. Die Entwicklung der Wasserqualität wird von der Wassertemperatur beeinflusst.

Die wesentliche Einschränkung bei der Modellanwendung von CE-QUAL-W2 resultiert aus der räumlichen Modellstruktur, welche lediglich mittlere Zustände über den Gewässerquerschnitt betrachtet. Größere Gewässer, in denen der Durchfluss oder die Wasserbeschaffenheit über den Fließquerschnitt stark variiert, können damit nicht nachgebildet werden. Dabei handelt es sich z. B. um die Hauptflüsse und größere Standgewässer mit annähernder Kreisform. Für die Parthe mit mittleren Wasserständen bis ca. 50 cm und mittleren Durchflüssen bis ca. 1 m³/s (Pegel Leipzig-Thekla) und deren Nebenflüsse sollte eine Anwendbarkeit des Modells gegeben sein, weil eine Mittelung über den Fließquerschnitt vertretbar erscheint.

Das Modellsystem ist modular aufgebaut. Damit ist es möglich, nur die für die aktuelle Fragestellung erforderlichen Prozesse nachzubilden und die Wasserqualität weitgehend von der Modellierung auszuschließen. Die Modellierung des Wärmehaushaltes der Gewässer erfolgt weitgehend physikalisch fundiert unter Verwendung allgemein anerkannter und verbreiteter Berechnungsansätze, die im Folgenden grob skizziert werden.

Wärmeaustausch über die Wasseroberfläche

Die Wärmemenge, die über die Wasseroberfläche ausgetauscht wird, ist eine Funktion von

- kurzwelliger Einstrahlung (Globalstrahlung),
- langwelliger Einstrahlung,
- reflektierter kurzwelliger Strahlung,
- reflektierter langwelliger Strahlung,
- langwelliger Ausstrahlung,
- Verlust an Verdunstungswärme,
- Wärmeableitung.

Die Berechnung der Strahlungsbilanz erfordert entweder detaillierte Messdaten oder zumindest Tageswerte von Globalstrahlung oder Sonnenscheindauer oder Bedeckungsgrad. Die Wärmeleitung kann anhand der Temperaturgradienten Wasseroberfläche-Luft berechnet werden. Der Verlust an Verdunstungswärme erfordert die Kenntnis der aktuellen Evaporationswassermenge. Diese kann mit mehreren Methoden berechnet werden, die sich nach Typ (empirisch, physikalisch fundiert) und Datenanforderung unterscheiden.

Wärmeaustausch über die Gewässersohle

Der Wärmeaustausch über die Gewässersohle ist abhängig vom Austauschkoeffizienten, welcher der Leitfähigkeit in der allgemeinen Transportgleichung entspricht, und dem Potenzialgradienten, welcher aus dem Unterschied zwischen Wasser- und Untergrundtemperatur entspricht. Letztere kann anhand der mittleren Lufttemperatur geschätzt werden.

Beschattung

Zur Berücksichtigung der Beschattung des Ufers wird der Sonnenstand (Azimut und Höhe) bezogen auf das aktuelle julianische Datum berechnet. Dies erfolgt für jede Stunde des Tages. Weiterhin wird für jeden Punkt im horizontalen Gewässerschnitt die Horizontabschirmung durch Vegetation am Gewässerufer und topografische Hindernisse entsprechend dem Digitalen Geländemodell berechnet. Liegt der Sonnenstand unter der Horizontabschirmung, wird die kurzwellige Einstrahlung reduziert. Die topografischen Verhältnisse (Fließrichtung, Gewässerbreite) werden explizit berücksichtigt.

Weitere temperaturrelevante Prozesse

Die Eisbildung und -ablation wird als wesentlicher thermisch relevanter Prozess im Modell berücksichtigt. Es können mehrere Methoden zum Ansatz kommen. Vereinfacht dargestellt erfolgt die Berechnung ähnlich wie für den Wasserkörper anhand der Strahlungsbilanz, der Temperaturgradienten und Austauschkoeffizienten Eis-Wasser und Eis-Luft. Weiterhin werden die Wärmeänderungen beim Phasenübergang berücksichtigt. Im Ergebnis kann der Eiskörper hinsichtlich Mächtigkeit und Temperatur charakterisiert werden.

SN-TEMP

SNTEMP wurde ursprünglich am U.S. Soil Conservation Service mit dem Ziel entwickelt, die Wassertemperatur in Fließgewässern unter verschiedenen wasserwirtschaftlichen und anderen Beeinflussungen wie Kühlwassereinleitungen, Stauanlagen, Grundwassernutzung, landwirtschaftliche Bewässerung, forstliche Bewirtschaftung, Kanalentwässerung u. ä. zu prognostizieren. Das Modell und seine Dokumentation ist frei verfügbar (<http://www.fort.usgs.gov/Products/Software/SNTEMP/>). Es handelt sich um ein Boxmodell, dessen Elemente unterschiedlichen Typs zu einem Gewässernetz verknüpft werden (Abbildung 53 nach BARTHOLOW 2000). Der Charakter des Modells ist empirisch.

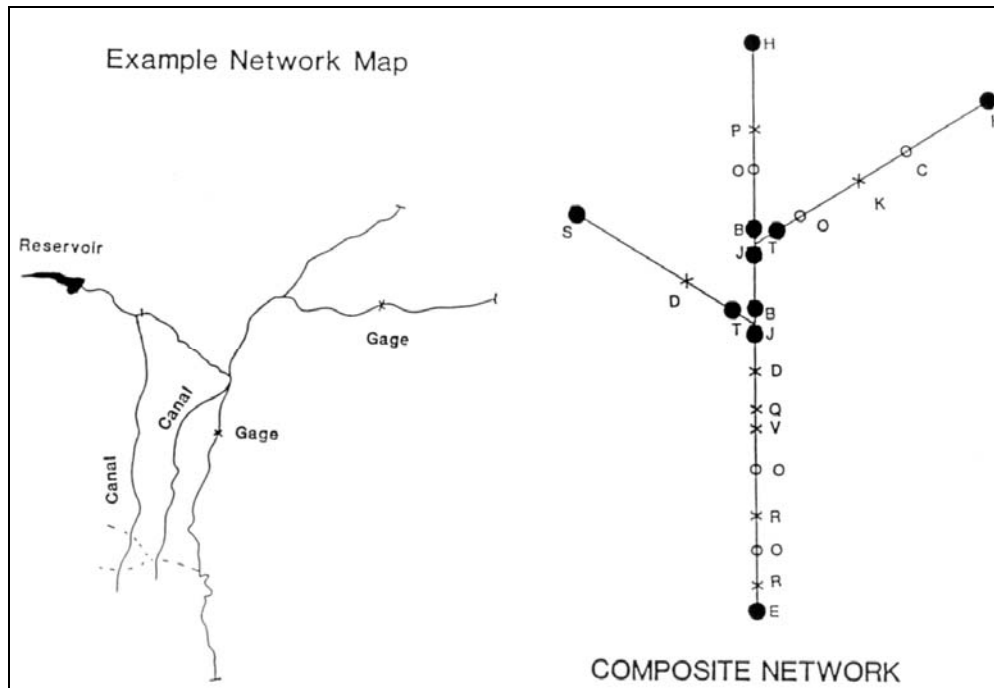


Abbildung 53: Diskretisierung eines Gewässernetzes in Form verknüpfter Elemente (nodes) in SNTEMP

Die Berechnung erfolgt auf der Basis von Tageswerten, es wird für jeden Tag ein Gleichgewichtszustand ermittelt (stationärer Zustand). Die Berechnung erfolgt damit im Gegensatz zu CE-QUAL-W2 nicht instationär bzw. dynamisch, d. h. Aussagen zu Maximalwerten von Durchfluss oder Temperatur sind nicht möglich. Die räumliche Diskretisierung erfolgt in Form eines Gewässernetzes, dessen einzelne Elemente (nodes) wie Quellen (H), Flussabschnitte (O), Mündungen (T), Speicherbecken (S) u. a. entsprechend mit Parametern belegt werden. Im Vergleich zu CE-QUAL-W2 bestehen einige weitere Einschränkungen:

- Eignung für Fließgewässer, eingeschränkte Eignung für Seen, Speicherbecken oder ähnliche Gewässer
- Abflussbildung, Abflusskonzentration und Wasserspiegellage werden nicht modelliert, sondern müssen extern ermittelt werden (Pegeldaten, N-A-Modelle, Wasserspiegellagenberechnung)
- Eignung nur für höhere Temperaturen $> 4\text{ °C}$, keine Modellierung der Eisbildung

In SNTEMP sind folgende Teilprozesse des Wärmehaushaltes implementiert (Abbildung 54):

1) Wärmebewegung, Energiebilanz

Hierbei handelt es sich um eine Bilanzgröße zwischen dem Wasser und seiner Umgebung. Es wird berücksichtigt:

- Einstrahlung/Reflexion: Sonnenstrahlung
- Einstrahlung/Reflexion: atmosphärische Strahlung
- Einstrahlung/Reflexion: von Vegetation und Topografie reflektierte Strahlung
- Evaporationswärmeverlust
- Konvektiver Wärmetransport (Niederschlag)
- Wärmeleitung (Austausch über das Gewässerbett)
- Reibungswärmegewinn
- Ausstrahlung

2) Wärmetransport mit dem Wasser im Fließgewässer über weite Strecken, Mischung von Oberflächenwässern

Der Abfluss im Fließgewässer (Durchfluss und Fließgeschwindigkeit) wird mit einer allgemeinen Fließformel für offene Gerinne berechnet.

3) Sonnenstrahlung

Strahlungsbilanz für die in den Gewässerkörper eindringende Sonnenstrahlung

4) Beschattung

Rückhalt von Sonnenstrahlung durch Topografie und Vegetation

5) Meteorologie

Berechnung der Abhängigkeit von Lufttemperatur, Luftfeuchte und Luftdruck von der Geländehöhe im Einzugsgebiet

6) Regressionsmodell

Füllen von Datenlücken, Datenbereinigung

Es werden folgende Inputdaten benötigt:

Geometrie:

- Plan des Flussnetzes, Fließlängen, Gewässerordnung
- Geländehöhen
- Gewässerbreiten
- Rauigkeitsparameter
- Informationen zur Beschattung

Meteorologie:

- Globalstrahlung
- Lufttemperatur
- relative Luftfeuchte
- Windgeschwindigkeit
- Bedeckungsgrad

Hydrologie:

- Durchfluss (Pegeldaten, N-A-Modellergebnisse)
- Wassertemperaturen zur Kalibrierung

Im Ergebnis der Modellierung liegen für jedes Element die berechneten Wassertemperaturen als Zeitreihen vor.

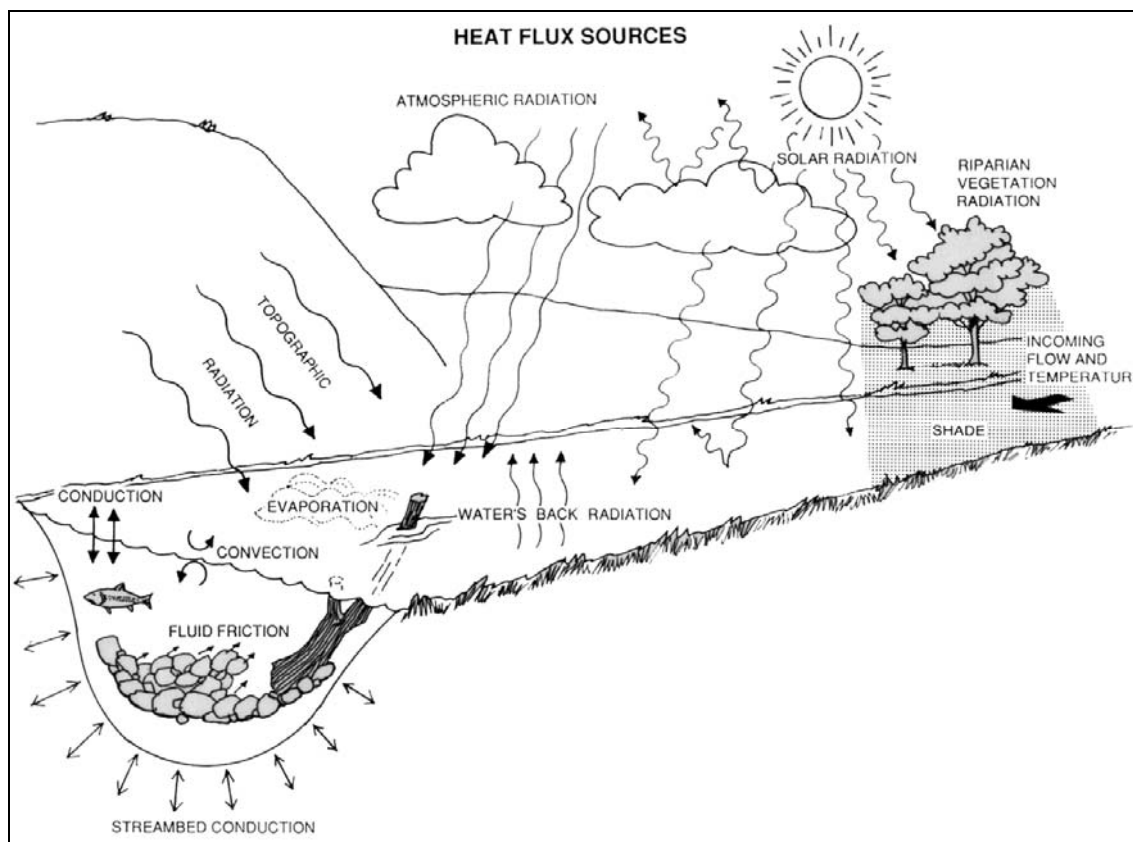


Abbildung 54: In SNTEMP berücksichtigte Teilprozesse des Wärmehaushaltes von Fließgewässern (BARTHOLOW 2000)

DFLOW

DFLOW ist ein Programm zur Ermittlung von Niedrigwasserereignissen auf der Grundlage einer statistischen Analyse von Durchflussmessreihen. Es ist als Entwicklung der U.S. EPA ausschließlich in den USA verbreitet und beinhaltet frei verfügbare gemessene Durchflüsse der dortigen Fließgewässerpegel. Die Niedrigwasseranalyse soll Schlussfolgerungen auf die Wasserqualität ermöglichen. Die Wassertemperatur wird weder berücksichtigt noch berechnet.

Weitere Gewässergütemodelle

Das Gewässergütemodell QSIM („Quality SIMulation“) wurde in der Bundesanstalt für Gewässerkunde entwickelt und wird zur Beurteilung der Auswirkungen wasserbaulicher Maßnahmen auf die Wasserbeschaffenheit großer Fließgewässer eingesetzt. Die Wassertemperatur wird als Energiebilanz aller wesentlichen Wärmeaustauschvorgänge im Gewässer berechnet. Das Einsatzgebiet des Modells beschränkt sich auf die großen Fließgewässer und Wasserstraßen.

WASP5 (Water Quality Analysis Simulation Program) ist ein Modellsystem der U.S. Environmental Protection Agency, welches die Schadstoffausbreitung in Gewässern simuliert. Der räumliche Aufbau ist ein- bis dreidimensional. Eigene Berechnungsansätze können als Module integriert werden. Das Modell berechnet die Wassertemperatur. Es ist frei verfügbar (http://www.scisoftware.com/products/wasp_overview/wasp_overview.html).

Ein weiteres frei verfügbares Gewässergütemodell mit Berechnung der Wassertemperatur im Fließgewässer ist QUAL2E (http://smig.usgs.gov/cgi-bin/SMIC/model_home_pages/model_home?selection=qual2e). Es ist eindimensional und berücksichtigt ein Gewässernetzwerk. Es ermöglicht die Simulation der täglichen Temperaturschwankungen im Fließgewässer. Eine instationäre Modellierung ist nicht möglich.

Konventionelle Wasserspiegellagenprogramme

Konventionelle Wasserspiegellagenprogramme wie REHM, WSP-WIN, KALYPSO, HEC-Ras dienen der hydraulischen Bemessung von Wasserbauwerken. Aus dem Durchfluss und der Geometrie der Vorfluter werden der Wasserstand und die Fließgeschwindigkeit berechnet. Die Wassertemperatur findet in konventionellen Wasserspiegellagenprogrammen keine Berücksichtigung und ist ebenso wenig Gegenstand der Modellierung.

5.3.5 Standgewässermodelle

Standgewässermodelle zur Wassertemperatur reduzieren das Gewässer entweder auf eine eindimensionale Wassersäule und bilden so die temperaturbedingte horizontale Schichtung nach, vereinfachen das Standgewässer als ein- bis zweidimensional horizontal durchströmt ohne vertikale Differenzierung oder bilden die Geometrie, Hydrodynamik und limnologische Schichtung detaillierter zwei- bis dreidimensional nach RUBBERT (2007). Es ist möglich, ein Standgewässer vollständig dreidimensional zu berechnen mit vertikaler und horizontaler Strukturierung.

Die Temperatur wird in Standgewässergütemodellen nachgebildet, weil sie die Wasserbeschaffenheit wesentlich beeinflusst, allerdings wird die temperaturabhängige limnologische Schichtung meist vereinfacht oder insbesondere bei flachen Standgewässern vernachlässigt. Standgewässergütemodelle mit Berücksichtigung

- der temperatur- und dichteabhängigen limnologische Schichtung,
- des Einflusses der Geometrie und des Windes auf die Mächtigkeit des Epilimnions,
- der strömungsbedingten Durchmischung und
- der Energieumwandlung und Wärmeübertragung an der Wasseroberfläche, am Zu- und Abfluss und am Gewässergrund

sind nicht für die Simulation längerer Zeiträume (> 10 a) geeignet aufgrund der hohen Komplexität und der daraus folgenden langen Rechenzeiten (RUBBERT 2007). Auf Flussgebietsebene werden deutlich reduzierte, empirische oder nur begrenzt prozessorientierte Modellansätze für die Gewässergüte verwendet, die tiefenabhängige Wassertemperatur wird dabei nicht simuliert.

Darüber hinaus gibt es Modelle, welche vorrangig der Prognose der limnologischen Schichtung tiefer Gewässer wie Seen und Talsperren dienen. Hierzu gehören die Modelle LAKE (eindimensionale thermo-hydrodynamische Modellierung) und HYDROMOD-3D der Firma HYDROMOD.

Eine exponierte Stellung unter den Standgewässermodellen, welche die limnologische Schichtung im Gewässer nachbilden, nimmt der Modellverbund SALMO-HR der TU Dresden und u. a. der Firmen HYDROMOD und METCON (<http://hhbio.wasser.tu-dresden.de/projects/getas/>) ein. Die Entwicklung erfolgt im Rahmen des Projektes GETAS (Gekoppelte hydrodynamisch-ökologische Simulation zur Bewirtschaftung von Talsperren), gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung.

SALMO-HR (HR = high resolution) wird u. a. in Sachsen zur Prognose der Schichtung und der chemisch-biologischen Wasserqualität in einigen Talsperren angewandt (Talsperre Saidenbach, Talsperre Bautzen). Hierzu wird das Gewässergütemodell SALMO gekoppelt mit mehreren Bausteinen, welche unterschiedliche Teilprozesse nachbilden. Die wichtigsten vermischungsrelevanten thermo-hydrodynamischen Prozesse werden mit dem eindimensionalen Modell LAKE simuliert, dessen Prognosegenauigkeit durch den gezielten Einsatz des dreidimensionalen Modells HYDROMOD-3D und des Modells IAMARIS unterstützt wird.

Der direkt gekoppelte hydrophysikalisch-ökologische Modellansatz SALMO-HR ermöglicht eine kombinierte Betrachtung von Wassermenge und Wassergüte. Die limnologische Schichtung des Gewässers wird nachgebildet (Winterstagnation, Vollzirkulation Frühjahr und Herbst, Sommerstagnation), ebenso Konvektion, Eis- und Schneebedeckung und andere Prozesse. Die Schichtung wird von der Hydrodynamik der Zu- und Abflüsse beeinflusst, wobei der Ablass des Beckens beliebig angeordnet werden kann.

Das Modellsystem trägt den veränderten Anforderungen und Möglichkeiten von Talsperrenbetreibern (z. B. Dynamisierung von Abfluss und Hochwasserschutzraum, flexible Wahl der Rohwasserentnahmetiefe) Rechnung. Zudem können die Rückwirkungen der biologischen auf die physikalischen Prozesse untersucht werden. Die Modellanwendung erfolgt jeweils für ein spezifisches Gewässer/eine Talsperre, die erstellten und kalibrierten Modelle sind komplex und nicht auf andere Gewässer übertragbar.

SALMO-HR befindet sich aktiv in Entwicklung. Es wird derzeit eingesetzt zur integralen Bewirtschaftung von Trinkwassertalsperren (IntegTA):

http://tu-dresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/fakultaet_forst_geo_und_hydro-wissenschaften/fachrichtung_wasserwesen/isiw/wv/forschung/integta

aber auch in der Grundlagenforschung zur Auswirkung des Klimawandels auf aquatische Ökosysteme (DFG-Schwerpunktprogramm AQUASHIFT):

<http://www.ifm-geomar.de/index.php?id=5286>

Neben der gekoppelten Version des Modells sind auch die Einzelmodelle separat verfügbar. Ansprechpartner zum Modell: Dr. Thomas Petzoldt, TU Dresden, Institut für Hydrobiologie.

Weitere Beispiele für Standgewässergütemodelle sind:

| | |
|--------|--|
| BELAMO | eindimensional, Temperaturschichtung, Mischung, Advektion, Sedimentation, Beschaffenheit |
| CAEDYM | hochaufgelöstes physikalisch begründetes prozessorientiertes Modell; Gewässerökologie, auch Fließgewässer, Ästuare und Küsten; kann gekoppelt werden mit ein-, zwei- und dreidimensionalen hydrodynamischen Modellen |

5.4 Kombination kompartimentbezogener Modelle

Modelle, die unterschiedliche Teilprozesse eines Vorgangs nachbilden, können im Verbund angewandt (gekoppelt) werden. Hier wird unterschieden zwischen der Offline-Kopplung und der Online-Kopplung.

Bei der Offline-Kopplung wird zunächst eines der Modelle über den gesamten Simulationszeitraum abgearbeitet. Das zweite Modell verwendet die Modellausgabe des ersten als Modellinput. Diese Kopplung ist einfach zu realisieren. Sie erfordert aber, dass die Modellausgabe des ersten und die Inputstruktur des zweiten Modells aufeinander abgestimmt sind. Weiterhin ist eine Rückkopplung nicht möglich. Ein Beispiel für die Offline-Kopplung wäre die Berechnung der Sickerwassertemperatur mit einem Bodenmodell und die Übergabe dieser Temperatur mit der Sickerwassermenge als obere Randbedingung an ein Modell wie Hydrus-2D bzw. der Grundwasserneubildung und deren Temperatur an ein Grundwassermodell.

Bei der Online-Kopplung interagieren die Modelle zur Laufzeit miteinander, d. h. ein Modell arbeitet jeweils nur einen Zeitschritt ab, übergibt die Ergebnisse und veränderten Parameter an das zweite Modell und dieses verfährt ebenso. Ein Beispiel ist die im Rahmen des KliWEP-Projektes realisierte Kopplung von WaSiM-ETH mit PCGEOFIM. Mit der Online-Kopplung agieren beide Modelle gleichwertig nebeneinander (Rückkopplung), sodass ein prozessorientierter Modellverbund möglich ist.

Zur Modellierung der Wassertemperatur bietet sich die Kopplung von Boden- und Grundwassermodellen an. Diese ist als Offline-Kopplung ohne weiteres möglich, wenn beide Modelle den Energiehaushalt und die Wärmebewegung nachbilden (z. B. CoupModel + Hydrus-2D). Im Rahmen der Recherche wurde keine bereits erarbeitete Online-Kopplung von Boden- und Grundwassermodellen der Temperatur gefunden. Für die Kopplung von Grundwasser- und Gewässermodellen konnte ebenfalls kein Beispiel gefunden werden, ebenso wenig für die Kopplung von Fließgewässern und Standgewässern.

Aufgrund des großen Aufwandes beim Aufbau eines Modellverbundes stellt sich die Frage nach dessen Notwendigkeit, wenn schwerpunktmäßig nur ein Kompartiment wie z. B. das Fließgewässer eines Einzugsgebietes interessiert. Die Grundwasser- bzw. Gewässerbetttemperatur kann durch eine vorangegangene spezifische Untersuchung auch annäherungsweise prognostiziert und ohne Modellkopplung dem Fließgewässer z. B. als veränderte Randbedingung vorgegeben werden, weil die Grundwassertemperatur für das Fließgewässer i. d. R. von untergeordneter Bedeutung ist.

5.5 Integrierte Modellansätze auf Einzugsgebietsebene

Als Einzugsgebietsmodelle werden solche Modellsysteme bezeichnet, die die hydrologischen Prozesse des Wasserhaushaltes, der Abflussbildung, der Grundwasserströmung und der Abflusskonzentration in der Vorflut nachbilden. Einige dieser Modelle erlauben die Simulation von temperaturabhängigen Stoffumsätzen z. B. an Stickstoff, Kohlenstoff oder Phosphor. In diese Modelle müssen Ansätze zur Schätzung oder Berechnung der Boden- und Wassertemperaturen integriert sein.

SWAT

SWAT (Soil and Water Assessment Tool) ist ein umfangreiches prozessorientiertes Einzugsgebietsmodell, welches die hydrologischen Vorgänge, den Stoff- und Sedimenttransport ausgehend von der Meteorologie bis hin zum Gebietsabfluss nachbildet. Die Entwicklung erfolgt am Agricultural Research Service des U.S. Departments of Agriculture. Die Modellsoftware und die Dokumentation sind frei verfügbar. Der Bedarf an Inputdaten beschränkt sich auf leicht zu messende und im Allgemeinen vorhandene Größen. Das Modell wird weltweit an einer Vielzahl von Einzugsgebieten angewandt.

Während die hydrologischen Prozesse einschließlich des Energiehaushaltes der Oberfläche und der Schneedynamik sehr detailliert nachgebildet werden, wird die Bodentemperatur mit einem stochastischen Ansatz unter Verwendung von Winkelfunktionen berechnet. Die Advektions-Dispensionsgleichung kommt nicht zum Einsatz. Die Wassertemperatur im Fließgewässer wird nach einem weiter vereinfachten stochastischen Ansatz geschätzt:

$$T_{\text{water}} = 5.0 + 0.75 \cdot T_{\text{air, mean}}$$

wobei eine zeitliche Verzögerung berücksichtigt wird. Alle anderen energetischen Prozesse im Oberflächenwasser werden vernachlässigt.

ArcEGMO

ArcEGMO ist ein GIS-gestütztes, multiskalig anwendbares hydrologisches Modellierungssystem. Es wurde gemeinsam vom Büro für Angewandte Hydrologie (BAH) Berlin und dem PIK (Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung) entwickelt. Die Wurzeln von ArcEGMO liegen in dem seit 1975 kontinuierlich entwickelten EinzugsGebietsMOdell EGMO.

Als hydrologisches Einzugsgebietsmodell ist ArcEGMO in der Lage, die hydrologischen Prozesse des Wasserhaushaltes, der Abflussbildung, der Abflusskonzentration in der Vorflut und der Grundwasserströmung nachzubilden. Damit sind alle wesentlichen vertikalen und lateralen hydrologischen Prozesse auf Einzugsgebietsebene erfasst.

Die räumliche Diskretisierung erfolgt GIS-gestützt als Einteilung des Einzugsgebietes in Elementarflächen, Hydrotope, Hydrotopklassen, Teileinzugsgebiete, Zwischengebiete (Eigeneinzugsgebiet eines Gewässerabschnittes), Gewässerabschnitte, Abflusskaskaden und Kaskadensegmente. Die zeitliche Diskretisierung ist variabel und liegt im Stunden- bis Monatsbereich.

Im Rahmen verschiedener wissenschaftlicher Untersuchungen ergaben sich bislang folgende Anwendungsbereiche für ArcEGMO:

- Großräumige Wasserhaushaltsbilanzen (Landschaftswasserhaushalt)
- Regionalanalysen (Mesoskala)
- Extremwertuntersuchungen
- Impaktanalysen zu Klimaänderungen
- Impaktanalysen zu Landnutzungsänderungen
- Fragen des Einzugsgebietsmanagements

Die Benutzung von ArcEGMO erfordert eine kostenpflichtige Lizenz (ca. 6.000 €). Es wird jedoch die projektbezogene Anwendung des Modells durch das BAH bevorzugt. Weil ArcEGMO modular aufgebaut wird, erfolgt die Strukturierung des Modells stets bezogen auf den konkreten Anwendungsfall. Der Modellentwickler ist an der Anwendung des Modells in Zusammenarbeit mit Forschungseinrichtungen im Rahmen größerer Vorhaben stets interessiert.

Mit dem Modul **PSCN** (Plant-Soil-Carbon-Nitrogen Model) wird vom BAH ein Modell des Wasser-, Energie- und Kohlenstoff-/Stickstoffhaushaltes entwickelt (ArcEGMO-PSCN). Das Ziel der Entwicklung besteht in der Simulation der Wasserdynamik und des Kohlenstoff- und Stickstoffhaushaltes im System Boden-Pflanze-Atmosphäre. Einsatzbereich ist die mittelmaßstäbige (1 km² bis 1.000 km²) Simulation des Wasser- und Kohlenstoff-/Stickstoffhaushaltes einer Region bei Berücksichtigung der Vegetations- und Ertragsentwicklung.

Das PSCN-Modul ist in die drei Hauptkomponenten Bodenmodell, Vegetationsmodell und Schneemodell untergliedert. Das Bodenmodell besteht aus einem Kohlenstoff-/Stickstoffmodell, einem Bodenwärmemodell und einem Bodenfeuchtemodell (Abbildung 55).

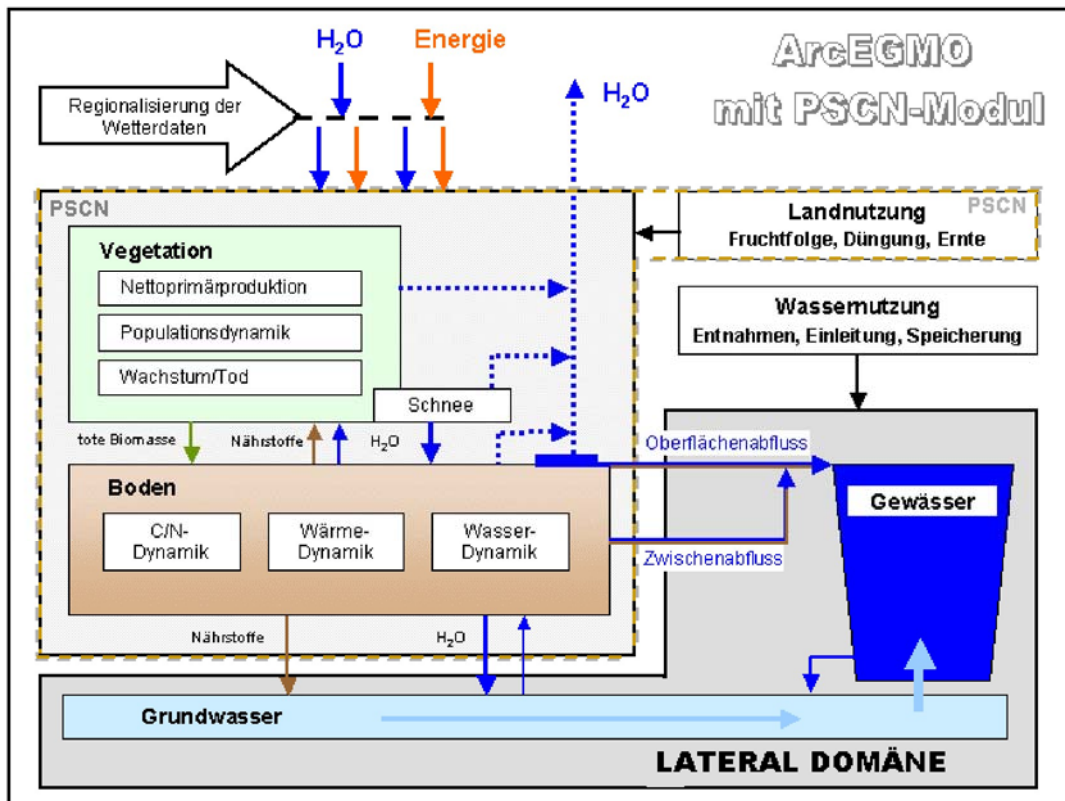


Abbildung 55: ArcEGMO – Überblick über die simulierten Teilprozesse des PSCN-Moduls (KLÖCKING & SUCKOW 2003)

Als treibende klimatische Größen werden Lufttemperatur, Niederschlag, Luftfeuchte und Globalstrahlung in täglicher Auflösung benötigt, die durch ArcEGMO für jedes simulierte Raumelement bereitgestellt werden. Die räumliche Auflösung erfolgt entsprechend des Aggregationsschemas von ArcEGMO auf Hydrotoplebene (Elementarfläche). Jedes Hydrotop ist durch eine bestimmte Landnutzung und einen Bodentyp charakterisiert und hat einen festen Raumbezug innerhalb des Untersuchungsgebietes.

Das Modell beinhaltet verschiedene Ansätze zur Simulation der Vegetationsentwicklung. Die Modellierung der Bodenprozesse erfolgt unter Berücksichtigung der horizontalen Schichtung des Bodens bis hinunter zum Ausgangssubstrat. Dabei werden bei grundwasserbeeinflussten Standorten auch temporär gesättigte Bodenschichten einbezogen. Die Wärmedynamik wird für das System Boden-Pflanze-Atmosphäre berücksichtigt. Damit kann die Temperatur der Pflanzen-, Schnee-, Bodenoberfläche und der Schneedecke und der Bodenschichten berechnet werden. Dies ist erforderlich, um die Ausgangsdaten für die Modelle der Vegetationsentwicklung und der Schneedecke bereitzustellen. Die Grund- und Oberflächenwassertemperaturen werden in PSCN derzeit nicht nachgebildet. PSCN wurde bereits im Parthe-Einzugsgebiet (Schnellbach) und im Rahmen von Untersuchungen zu Bodenwasserhaushalt und Klimawandel im EZG der Schwarzen Elster angewandt.

Es ist prinzipiell möglich, PSCN so zu erweitern, dass die Temperatur als Randbedingung an das Grundwasser übergeben wird. Ebenfalls besteht die Möglichkeit, die Temperatur in das Modul der Grundwasserströmung von ArcEGMO zu integrieren und Grund- und Fließgewässer prozessorientiert zu koppeln. Die BAH (Ansprechpartner: Dr. Beate Klöcking) arbeitet als Modellentwickler ständig an der Weiterentwicklung von PSCN und ArcEGMO und ist steht einer Zusammenarbeit im Rahmen eines Kooperationsvertrages offen gegenüber.

Modellentwicklung

ArcEGMO wird derzeit in verschiedenen Richtungen nach unterschiedlichen Problemstellungen weiterentwickelt. Weil es sich um ein ganzheitliches Einzugsgebietsmodell handelt, das die hydrologischen Prozesse beginnend bei der Hydrometeorologie über die Sickerwasserdynamik und Grundwasserströmung bis zur Abflusskonzentration in der Vorflut berücksichtigt, ist eine integrierte Modellierung der Wassertemperatur aller Kompartimente des Oberflächen-, Sicker- und Grundwassers möglich.

LARSIM-WT

LARSIM (Large Area Runoff Simulation Model) ist ein auf Rasterdaten oder einer einzugsgebietsbezogenen Flächenaufteilung basierendes makroskaliges Wasserhaushaltmodell, welches als Grundlage großräumiger Anwendungen in Baden-Württemberg im Rahmen des Kooperationsvorhabens „Klimaveränderungen und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft“ diente. Es bildet alle wesentlichen hydrologischen Prozesse kontinuierlich auf der Basis von Stunden- oder Tagesreihen oder ereignisspezifisch mit hoher zeitlicher Auflösung nach (Abbildung 56 aus BREMICKER 2000). Die Anwendung erfolgt für große Landflächen, z. B. die Einzugsgebiete großer Flüsse.

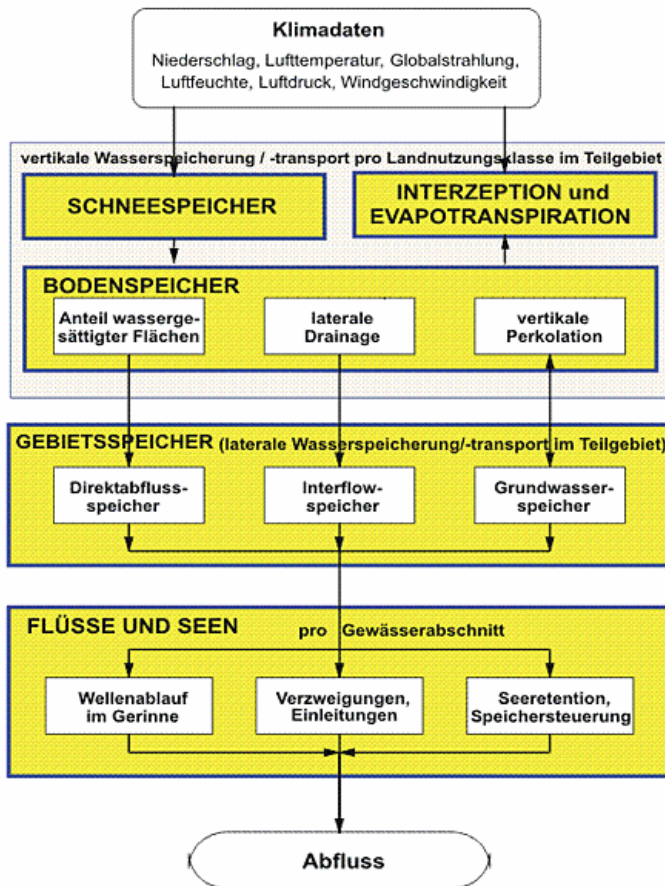


Abbildung 56: Modellschema LARSIM

Wasserhaushaltmodell LARSIM

LARSIM ist deterministisch, d. h. es werden die Ursache-Wirkungs-Beziehungen explizit nachgebildet. Es werden die wesentlichen Teilprozesse des Wasserhaushaltes mit deterministischen Modellansätzen beschrieben: Interzeption, Evapotranspiration, Schneeakkumulation, -kompaktion und -schmelze, Bodenwasserspeicherung, Speicherung und lateraler Wassertransport in der Fläche sowie Translation und Retention in Gerinnen und Seen. Hinzu kommen Verfahren zur Korrektur, Umrechnung und Interpolation meteorologischer Messgrößen. Die Interpolation erfolgt ausgehend von Stationsdaten für jede Raster- bzw. Teilfläche im Modell. Weiterhin können anthropogene Steuerungen wie Wassereinleitungen, Wasserüberleitungen sowie Abflussregelungen durch Rückhaltebecken und Talsperren im Modell nachgebildet werden.

Zur Berechnung der hydrologischen Prozesse werden Gebietsspeicher nachgebildet wie z. B. Interzeptionsspeicher, Schneespeicher oder Bodenspeicher. Der Abfluss der Landflächen wird in Form dreier Gebietsspeicher berücksichtigt: Direktabfluss-speicher, Interflowspeicher und Grundwasserspeicher. Der Direktabfluss wird in Abhängigkeit vom Anteil gesättigter Böden der Rasterflächen berechnet, der laterale Abfluss und die Perkolation in Abhängigkeit von der Bodensättigung. Ein kapillarer Aufstieg aus dem Grundwasser wird berücksichtigt. Die Verdunstung von Land- und Wasserflächen wird mit physikalisch begründeten Ansätzen berechnet (PENMAN-Verdunstung freier Wasserflächen, PENMAN-MONTEITH-Ansatz für Landflächen). Der aerodynamische und der Oberflächenwiderstand von Landflächen werden in Abhängigkeit von der Landnutzung und der aktuel-

len Bodenfeuchte berechnet. Versiegelte Flächen können berücksichtigt werden. Hinsichtlich der Wassertemperatur ist die physikalisch basierte Berechnung der Strahlungsbilanz und des Bodenwärmestromes von Bedeutung.

Zur Nachbildung der Oberflächengewässer werden die Rasterzellen des Modells mittels Gewässerteilstrecken miteinander verbunden, die in ihrer Summe das reale Flussnetz nachbilden. Dabei sind jeder Gewässerteilstrecke geometrische Angaben zu Flusslänge, Gefälle sowie zu Breite und Höhe des mittleren Querprofils vorzugeben. Die detaillierte Interaktion zwischen Vorfluter und Grundwasser wird nicht nachgebildet. Bei der Berechnung der Translation und Retention im Gerinne werden vereinfachende Annahmen getroffen. So werden einheitliche geometrische Verhältnisse innerhalb der betrachteten Gerinnestrecke vorausgesetzt, die durch ein Doppeltrapezmodell beschrieben werden können. Seerückhalt und wasserwirtschaftliche Eingriffe wie Rückhaltebecken, Verzweigungen, Wasseraus-, Ein- und Überleitungen können nachgebildet werden.

Eine Kalibrierung des Modells anhand gemessener Durchflüsse ist erforderlich. Das Modell ist zum laufenden Betrieb mit zeitnah gemessenen Wetterdaten und Durchflüssen geeignet, sodass kurzfristige Prognosen für die nächsten Tage möglich werden. Die Modellanpassung an die gemessenen Durchflüsse erfolgt automatisiert. Das Modell ist zur kurzfristigen Hoch- und Niedrigwasserprognose geeignet. Typische Anwendungen auf Rasterbasis erfolgten bislang Rasterflächengrößen von 1 km² (Landesfläche Baden-Württemberg, Einzugsgebiet Neckar) bis zu 400 km² (Einzugsgebiet der Ostsee). Die Anwendbarkeit ist nach HAAG & LUCE (2008) weltweit und für Einzugsgebietsflächen von 10 km² Größe bis mehr als 1 Mio. km² Größe gegeben.

Im Berechnungsmodus „Flussgebietsmodell“ wird LARSIM bei der Hochwasservorhersagezentrale Baden-Württemberg für die operationelle Abflussvorhersage zahlreicher Flussgebiete eingesetzt. Auch in Bayern, Hessen und Rheinland-Pfalz wird das Modell zur operationellen Hoch- und Niedrigwasservorhersage genutzt.

Wasserhaushalt- und Wassertemperaturmodell LARSIM-WT

Das Wasserhaushalt LARSIM selbst ist nicht in der Lage, die Wärmeumsätze bzw. Wassertemperaturen nachzubilden. Es wurde jedoch im Rahmen des KLIWA-Vorhabens um die Wärmebilanzrechnung erweitert (HAAG & LUCE 2008; HYDRON INGENIEURGESELLSCHAFT FÜR UMWELT UND WASSERWIRTSCHAFT MBH, KARLSRUHE, im Auftrag der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg). Die entstandene erweiterte Modellvariante LARSIM-WT berücksichtigt die komplette Energiebilanz der Fließgewässer (durchgängig deterministischer Ansatz) unter expliziter Berücksichtigung von Wärmequellen. Der Schwerpunkt liegt bei der Simulation der Wassertemperatur im gesamten Fließgewässernetzwerk. Das Modellschema von LARSIM-WT ist in Abbildung 57 (aus HAAG et al. 2005) dargestellt.

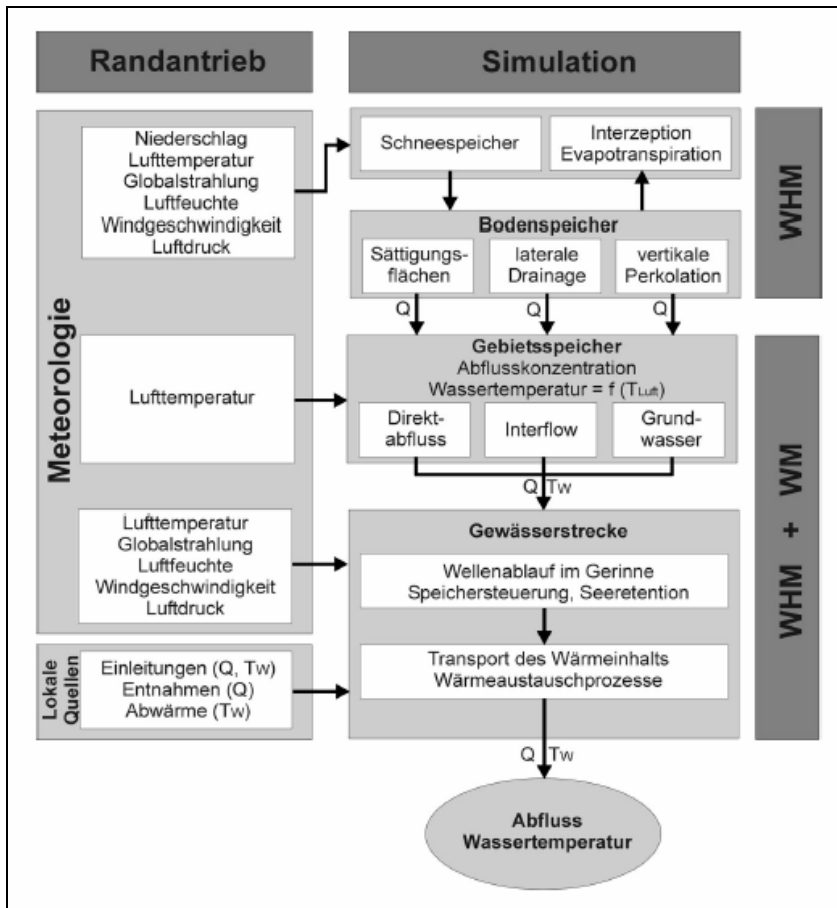


Abbildung 57: Modellschema von LARSIM-WT

Das Modell wird seit 2004 kontinuierlich für operationelle Vorhersagen der Wassertemperatur im Neckar-Einzugsgebiet unter Einbeziehung von Kraftwerksmodellen, gemessenen und vorhergesagten meteorologischen Daten eingesetzt. Es hat sich zur operationellen Vorhersage für bis zu sieben Tage bewährt. Weiterhin wurde es erfolgreich angewandt zur Prognose der Auswirkungen des Klimawandels auf die Wassertemperatur.

Das Modell LARSIM-WT ist als Entwicklung der Hydron Ingenieurgesellschaft für Umwelt und Wasserwirtschaft mbH Karlsruhe nicht frei erhältlich.

Deterministische Modellierung der Gewässertemperatur

Der Energieumsatz bei den Oberflächenprozessen Interzeption, Schneeakkumulation und -schmelze, Evapotranspiration der Landoberflächen und Bodenwasserdynamik wird nicht explizit berücksichtigt. Vielmehr wird die Temperatur der Abflusskomponenten Direktabfluss, Interflow und Grundwasserabfluss, die in die Vorflut gelangen, jeweils in einfacher linearer Abhängigkeit von der Lufttemperatur berechnet.

Der Schwerpunkt des Modells liegt in der Simulation der Wärmeaustausch- und Transportprozesse entlang der Flussabschnitte. Der Transport wird berücksichtigt mit einer eindimensionalen Advektions-Dispersionsgleichung:

$$\frac{\partial WT}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial WT}{\partial x} = E_x \cdot \frac{\partial^2 WT}{\partial x^2} \pm S$$

| | | |
|-----|----|-------------------------------------|
| mit | WT | Wassertemperatur [°C] |
| | t | Zeit [s] |
| | x | Distanz in Fließrichtung [m] |
| | u | mittlere Fließgeschwindigkeit [m/s] |

- E_x longitudinaler Dispersionskoeffizient [m^2/s]
 S Quell-/Senkenterm [$^{\circ}C/s$]

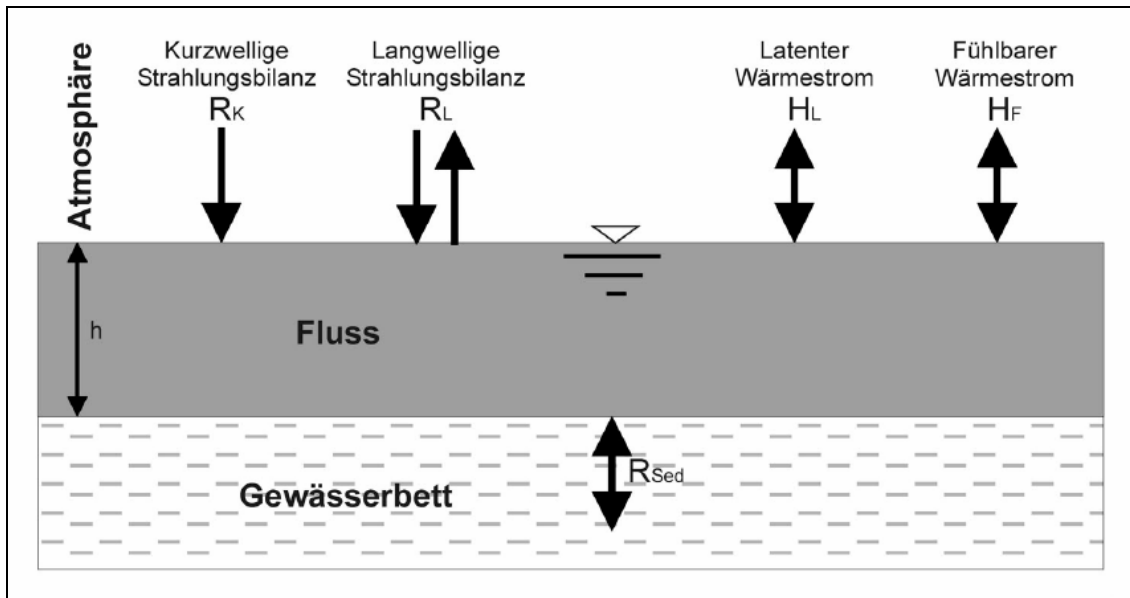


Abbildung 58: In LARSIM-WT berücksichtigte Wärmeaustauschprozesse, aus HAAG et al. (2005)

Die mittlere Fließgeschwindigkeit wird anhand der Fließgewässergeometrie und des Durchflusses berechnet, welcher als Ergebnis des Wasserbilanzmoduls für das jeweilige Einzugsgebiet vorliegt. Der Dispersionskoeffizient wird modellintern geschätzt. Mittels des Quell- bzw. Senkenterms kann die Temperaturänderung über den Fließgewässerabschnitt berücksichtigt werden, welche aufgrund lokalen Quellen und Zuflüssen und aller relevanten Energieumsatzprozesse eines Fließgewässers stattfindet. Dies sind, ausgedrückt als Rate der Temperaturänderung:

$$\frac{dWT}{dt} = \frac{R_S + R_L + H_S + H_L + H_{SED}}{c_p \cdot \rho_W \cdot h}$$

- mit
- c_p spezifische Wärmekapazität des Wassers [$J/(kg \cdot ^{\circ}C)$]
 - ρ_W Dichte des Wassers [kg/m^3]
 - h mittlere Wassertiefe [m]
 - R_S kurzwellige Nettostrahlung [W/m^2]
 - R_L langwellige Nettostrahlung [W/m^2]
 - H_L latenter Wärmestrom [W/m^2]
 - H_S fühlbarer Wärmestrom [W/m^2]
 - H_{SED} Wärmeleitung aus dem bzw. in den Untergrund über das Gewässerbett [W/m^2]

Die kurz- und langwelligen Strahlungsbilanzen werden physikalisch fundiert berechnet. Die Albedo wird in Abhängigkeit von der geografischen Breite und der Jahres- und Tageszeit variiert. Ein Beschattungskoeffizient berücksichtigt die Beschattung durch die Ufervegetation und die Topografie. In die langwellige Strahlungsbilanz gehen die Ausstrahlung des Gewässers und die Gegenstrahlung der Atmosphäre ein. Die Wassertemperatur bestimmt die langwellige Ausstrahlung nach der Stefan-Boltzmann-Gleichung. In die Berechnung der Gegenstrahlung, die von der Bewölkung abhängt, gehen weiterhin die Lufttemperatur, der aktuelle Dampfdruck und die Sonnenscheindauer ein.

Der Strom an latenter Wärme wird berechnet in Abhängigkeit von der Freiwasserverdunstung bzw. -kondensation, in deren Berechnung wiederum die Wassertemperatur, der Dampfdruck der Luft und die Windgeschwindigkeit eingeht. Dabei wird die windhemmende Wirkung der Ufervegetation berücksichtigt.

Der Strom an fühlbarer Wärme wird berechnet in Abhängigkeit von der Luft- und Wassertemperatur, dem Luftdruck, der Windgeschwindigkeit und des windhemmenden Einflusses der Ufervegetation. Die Wärmeleitung aus dem bzw. in den Untergrund über das Gewässerbett wird berechnet anhand der Wärmeleitfähigkeit des Gewässerbetts, der Wassertemperatur und der Sedimenttemperatur:

$$H_{\text{SED}} = -K_{\text{SED}} \cdot (WT - T_{\text{SED}})$$

mit H_{SED} Wärmeleitung über das Gewässerbett
 K_{SED} Wärmetransferkoeffizient [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$]
 WT Wassertemperatur [$^\circ\text{C}$]
 T_{SED} Temperatur des Flussbetts nahe am Wasserkörper [$^\circ\text{C}$]

und

$$\frac{dT_{\text{SED}}}{dt} = \frac{K_{\text{SED}}}{CZ_{\text{SED}}} \cdot (WT - T_{\text{SED}})$$

mit CZ_{SED} effektive Wärmekapazität des Flussbetts [$\text{J}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$]

Der Wärmetransferkoeffizient und die effektive Wärmekapazität des Gewässerbetts sind Parameter, die als Funktionen der Mächtigkeit der Sedimentschicht, der Wärmeleitfähigkeit des Gewässerbetts, seiner spezifischen Wärmekapazität und seiner Dichte geschätzt werden können. Bei der Berechnung der Energiebilanz nicht berücksichtigt werden die Wärmezufuhr mit dem direkten Niederschlag, Wärmekonvektion/-advektion mit dem Grundwasser und die Wärmezufuhr durch innere Reibung und Reibung zwischen Wasser und Gewässerbett, weil der Anteil dieser Energieumsätze an der Energiebilanz des Gewässers im Vergleich zu den anderen Prozessen vernachlässigbar klein ist.

Berechnung der Wassertemperatur mittels Regressionsmodell

Als Alternative zu den beschriebenen physikalisch basierten Berechnungsansätzen können Regressionsmodelle zur Anwendung kommen, welche die Wassertemperatur eines definierten Standortes in Abhängigkeit von der Lufttemperatur und dem Durchfluss beschreiben. Die Anpassung des Regressionsmodells an die Messdaten erfolgt automatisch. Weil das Regressionsmodell ausschließlich anhand des derzeitigen Zustandes erstellt wird, ist die Anwendung zur Prognose im Hinblick auf den Klimawandel problematisch.

In LARSIM-WT wurde das Regressionsmodell nach MOHSENI und STEFAN (1999) in HAAG & LUCE (2008) erweitert um die Berücksichtigung des Tagesganges der Lufttemperatur, sodass Messdaten für jeden Zeitpunkt ausgewertet werden können. Weiterhin wurde als zusätzliche Einflussvariable auf die Wassertemperatur der Durchfluss eingeführt. Mit dem angepassten Regressionsmodell ist die Berechnung der aktuellen Wassertemperatur und eine Vorhersage über mehrere Tage möglich. Das Regressionsmodell dient somit zur operationellen Vorhersage, ist aber weniger geeignet zur Prognose der Veränderung der Wassertemperaturen aufgrund des Klimawandels.

Probleme:

- makroskaliger Ansatz, ggf. weniger geeignet für kleine Einzugsgebiete
- Wasserströmungen werden in Form von Rechenspeichern berücksichtigt, die Grundwasserströmung wird nicht explizit modelliert.
- Die Temperatur des Abflusses, der in die Vorflut gelangt, wird stark vereinfacht anhand der Lufttemperatur geschätzt; die erhöhte Temperatur von Abflüssen auf versiegelten, aufgeheizten Flächen bei kleinskaliger Betrachtung kann nicht berücksichtigt werden.
- Der Abfluss in der Vorflut wird stark vereinfacht, Interaktionen zwischen Grund- und Oberflächenwasser werden nicht detailliert nachgebildet.

WaSiM-ETH

Das an der ETH Zürich entwickelte und in Mitteleuropa vielfach angewandte und validierte Modell WaSiM-ETH (Water balance Simulation Model) dient der Berechnung des Gebietswasserhaushaltes von Einzugs-/Flussgebieten. Es handelt sich um ein flächendetailliertes, physikalisch basiertes Einzugsgebietsmodell für die meso- und makroskalige Einzelereignis- und Langzeitsimulation (vgl. **Anlage 6.10**). Berücksichtigt werden alle Prozesse des Wasserhaushaltes (Verdunstung, Schneedynamik, Oberflächenabfluss, Infiltration, zweidimensionale Bodenwasserbewegung, Grundwasser), der Abflusskonzentration und des Wellenablaufes. Das Modell wurde seit seiner Entwicklung mehrfach erweitert (Einführung der Richards-Gleichung für das Bodenmodul, Erweiterung des Schichtaufbaus des Bodens, Einführung einer expliziten Zeitschrittsteuerung des Richards-Moduls, Möglichkeit der Bewässerung, Berücksichtigung von Freiwasseroberflächen, Verbesserung der Parametrisierung von Vernäsungsflächen, Berücksichtigung komplexer Vegetationsstrukturen) und zur Anwendung im Rahmen des KliWEP-Projektes Parthe mit dem Grundwassermodell PCGEOFIM gekoppelt.

Die Berechnung der Energiebilanz der Landoberfläche erfolgt mit dem Ziel der Berechnung der Evapotranspiration. Der Wärmehaushalt wird nicht modelliert, sodass Boden- und Grundwassertemperatur nicht berechnet werden können. Am UFZ wird allerdings das Modellsystem IWAN entwickelt, das aus einer Kopplung verschiedener Modelle besteht. Dieses enthält ein Modul zur Berechnung der Bodentemperatur mit dem Ziel der Simulation von Oberflächenabflüssen über gefrorenem Boden. Weil die Grundwasserbewegung in WaSiM-ETH nur stark vereinfacht zweidimensional integriert ist, kann die Grundwassertemperatur nicht berechnet werden. Hierzu ist eine Kopplung mit einem Grundwassermodell erforderlich, das auch die Wärmebewegung nachbildet.

Weitere hydrologische Einzugsgebietsmodelle mit Stoffkreislauf

In LfUG (2008a) werden Einzugsmodelle beschrieben, die den Stofftransport im Einzugsgebiet am Beispiel von Stickstoff und teilweise auch weiterer Parameter nachbilden. Die Stickstoffumsätze sind temperaturabhängig. Der Einfluss der Temperatur wird aber in einigen Modellen nur vereinfacht nachgebildet, sodass sich diese Modelle (MODIFFUS, INCA) in ihrer derzeitigen Form nicht zur Modellierung der Wassertemperatur eignen.

In IWAN ("Integrated Winter Erosion and Nutrient Load Model"), einer Modellentwicklung des UFZ, wird WaSiM-ETH um ein Bodentemperaturmodul ergänzt, um Oberflächenabfluss bei gefrorenem Boden nachzubilden. Die Modellumgebung JAMS („Jena Adaptable Modelling System“) bildet als Einzugsgebietsmodell die Bodentemperaturen mit einem einfachen stochastischen Ansatz nach, um den Einfluss der Temperatur auf die Stoffumsätze im Boden und auf die Vegetationsentwicklung berücksichtigen zu können.

5.6 Zusammenfassung

Im Ergebnis der durchgeführten Modellrecherche konnte kein Modell gefunden werden, welches alle energetischen Prozesse im Einzugsgebiet nachbildet, beginnend beim meteorologischen Geschehen und den Energieumsätzen an der Landoberfläche, weiter über die Wärmebewegung im Boden- und Grundwasserbereich bis zum Fließ- und Standgewässer mit deren spezifischen Energieumsätzen. Es werden jedoch alle relevanten Teilmodelle mit vorhandenen Modellen berücksichtigt, allerdings wurden die vorhandenen Modelle mit einer eigenen Zielstellung entwickelt, die nur einen Bereich einer ganzheitlichen integrierten Betrachtung abdeckt. Viele Modelle, insbesondere Bodenwasser-, Grundwasser-, Fließgewässer- und Standgewässermodelle, betrachten jeweils nur ein Kompartiment. Darüber hinaus gibt es Modelle, welche sowohl die ungesättigte Zone (Bodenwasser) als auch die gesättigte Zone (Grundwasser) sowohl hydraulisch als auch thermisch nachbilden. Weiterhin gibt es zwar ganzheitliche Einzugsgebietsmodelle, welche die hydrologischen Prozesse vom Boden bis zum Gewässer nachbilden, diesen fehlt jedoch die Möglichkeit einer prozessorientierten Berechnung der Wassertemperaturen. Bestenfalls wird die Interaktion zwischen Gewässer- und Grundwassertemperatur mit vereinfachten statistischen Ansätzen nachgebildet.

Bodenwassermodelle erlauben eine detaillierte Berechnung der Bodenwasser- und Sickerwassertemperaturen. Sie sind zur Kopplung mit Grundwassermodellen geeignet, denen die Temperatur der Grundwasserneubildung als obere Randbedingung übergeben werden kann. Ohne die Kopplung mit einem Grundwassermodell ist keine prozessorientierte Verbindung des Bodens mit dem Oberflächengewässer möglich.

Grundwassermodelle berücksichtigen die Grundwassertemperatur meist nicht. Falls doch, sind sie für Spezialfälle entwickelt worden (Geothermie). Diese Modelle sind nicht frei verfügbar. Eine prozessorientierte Kopplung solcher Modelle mit dem Gewässer konnte nicht recherchiert werden. Es wurde kein Modell bzw. Modellverbund gefunden, welches den räumlich und zeitlich differenzierten Grundwasserzustrom und damit verbundenen Wärmestrom zum Oberflächengewässer nachbildet.

Die Wassertemperatur in **Fließgewässern** wird in dafür speziell entwickelten Modellen oder standardmäßig in Gewässergütemodellen berechnet. Die ersteren sind meist für einzelne Anwendungsfälle entwickelt worden oder anderweitig spezialisiert. Die Gewässergütemodelle sind aufwändig zu parametrisieren (Gewässervermessung, Abflussregime). Die Simulation der Gewässergüte erfolgt i. d. R. reduziert auf den Gewässerschlauch, Interaktionen mit dem Einzugsgebiet werden nicht detailliert nachgebildet. Ein räumlich und zeitlich differenzierter Grundwasserzustrom in das Gewässer mit Kopplung der Grundwasser- und Fließgewässertemperatur wird in Gewässergütemodellen nicht prozessorientiert nachgebildet und höchstens vereinfacht wiedergegeben, Schnittstellen zu Grundwassermodellen sind nicht vorhanden. Die Kopplung mit Grundwassermodellen ist bereits deshalb schwierig, weil die Nachbildung des instationären Durchflusses im Gewässer deutlich kleinere Zeitschritte erfordert als die instationäre Strömung des Grundwassers.

Standgewässermodelle sind für den universellen Einsatz nicht verfügbar, weil jedes Gewässer hinsichtlich des hydrologischen Regimes von Zu- und Abfluss, der Gewässermorphologie, der Beschaffenheit oder der Bewirtschaftung einzigartig ist. Die thermisch-hydrodynamische Schichtung in Standgewässern zu modellieren, erfordert einen sehr großen rechentechnischen Aufwand. Die Parametrisierung erfordert eine Vielzahl von Daten und Informationen. Die Einbindung von Standgewässergütemodellen in komplette Flussgebietsmodelle ist deshalb bisher weitgehend unterblieben.

Der Verbund mehrerer Modelle (**Kopplung**) lässt zwar die Betrachtung mehrerer Kompartimente zu, ist aber mit einem großen Aufwand verbunden. Hier ist besser ein schrittweises Vorgehen zu prüfen, indem erst die Boden- und Grundwassertemperatur abschließend betrachtet wird, später die Gewässertemperatur unter Verwendung der Ergebnisse zur Grundwassertemperatur als Inputinformation.

Bei integrierten Modellen auf **Einzugsgebietsebene** handelt es sich meist um hydrologische Modelle, welche nur den Energieumsatz der Landoberfläche für die Verdunstungs-, Schnee- und Bodenfrostdynamik nachbilden. Die Grundwassertemperatur wird nicht prozessorientiert berechnet. Mit Zielstellung der Modellierung der Stickstoff-, Kohlenstoff- und Phosphorumsätze auf Einzugsgebietsebene ist die Bodentemperatur oft integriert, aber in Form vereinfachter stochastische Ansätze. Auch die Berücksichtigung der Gewässertemperatur erfolgt nur vereinfacht und weniger physikalisch begründet als bei den reinen Fließgewässergütemodellen. Falls Standgewässer überhaupt modelliert werden, wird deren thermische Schichtung nicht berücksichtigt. Eine prozessorientierte Verbindung von Grundwasser und Gewässer existiert nicht. Darüber hinaus sind geeignete Modelle mit Temperaturberücksichtigung wie LARSIM-WT oder ArcEGMO kostenpflichtig.

Insgesamt wird für die Weiterführung des Vorhabens empfohlen schrittweise vorzugehen, wenn alle Kompartimente vom Bodenwasser bis zum Gewässer untersucht werden sollen. Eine Kopplung von Modellen wird nur für das Boden- und Grundwasser empfohlen und zur Reduzierung des Aufwandes nur in Form der Offline-Kopplung. Die Erkenntnisse zur Veränderung der Grundwassertemperatur können als Inputinformation für ein Gewässermodell dienen, welches aber letztlich relativ autark betrieben werden kann.

6 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen für weitere Studien

Aufgrund der großen wasserwirtschaftlichen und ökologischen Bedeutung der Wassertemperatur wurde die C&E GmbH mit einer Vorstudie zur Recherche, Homogenisierung und Plausibilisierung von verfügbaren Daten zu Langzeitreihen der Wassertemperatur durch das Sächsische Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie beauftragt. Das Ziel der beauftragten Leistung besteht

- in der Klärung der verfügbaren Datenlage zu möglichst lückenlosen Langzeit-Temperaturreihen für Oberflächengewässer, Sicker-, Boden- und oberflächennahem Grundwasser,
- in der Analyse der statistischen Zusammenhänge zwischen Lufttemperatur und den Wassertemperaturen der genannten Kompartimente und
- in der Überprüfung der Möglichkeiten, die erhobenen Daten für die Kalibrierung eines Modells zur Abschätzung der Auswirkungen des Klimawandels auf die Wassertemperaturen in Sachsen zu nutzen.

Datenrecherche, Homogenisierung und Plausibilisierung

Im Rahmen der Vorstudie wurde eine Recherche von Temperaturen im Oberflächenwasser (Standgewässer, Fließgewässer, Quellen), Boden- und Sickerwasser und im oberflächennahen Grundwasser durchgeführt. Diese Recherche betraf in erster Linie das LfULG und die BfUL, aber auch weitere Behörden, Institutionen und Betreiber von wasserwirtschaftlichen Anlagen.

Die in der Vorstudie recherchierten und bereits in die Projektdatenbank integrierten umfangreichen Messdaten der Temperatur von Oberflächen-, Grund- und Boden-/Sickerwasser umfassen ca. 600.000 Datensätze. Sie wurden weitgehend homogenisiert und einer Plausibilitätskontrolle unterzogen. Ausreißer wurden entfernt. Es verbleibt ein Sprung bei den Temperaturreihen des Grundwassers (Stichtagsmessungen), der auf eine Veränderung der Messmethodik zurückgeht. Dies sollte bei der Anwendung der Daten zur Modellkalibrierung oder weiterführenden statistischen Auswertung beachtet werden. Weitere Schwierigkeiten bestehen bei der Auswertung der Daten der Standgewässer, insbesondere wenn Rückschlüsse auf die limnologische Schichtung des Gewässers gezogen werden sollen, weil die Temperaturentwicklung durch die Gewässerbewirtschaftung und sonstige Einflüsse beeinflusst wird, diese Einflüsse jedoch normalerweise nicht hinreichend bekannt sind. Die Datenreihen des Grundwassers reichen oft nicht weit in die Vergangenheit. Abgesehen von den aufgezeigten Schwierigkeiten ist die Datenbasis umfangreich und kann der weiterführenden statistischen Auswertung und Modellkalibrierung dienen. Hier ist hervorzuheben, dass den Datensätzen die meteorologischen Daten zugeordnet wurden, sodass unabhängig vom Standort der Messstelle ein Bezug zur Lufttemperatur und Globalstrahlung als die wesentlichen Einflussgrößen hergestellt werden kann.

Auswahl eines Modellgebietes

Das südöstliche Einzugsgebiet der Parthe eignet sich als Modellgebiet für die Fortführung des Vorhabens, weil es kaum anthropogen beeinflusst ist. Dies gilt insbesondere für das Einzugsgebiet des Schnellbachs, welches bereits Gegenstand entsprechender Untersuchungen war. Es enthält neben verschiedenen Landnutzungen und den Vorfluter auch ein Standgewässer.

Die genannten Teilgebiete sind relativ klein (Schnellbach: 8 km², Oberlauf Parthe: 33 km³). Soll ein meso- oder makroskaliges Einzugsgebietsmodell angewandt werden, sollte ein anderes gut beobachtetes sächsisches Gewässereinzugsgebiet als Modellgebiet verwendet werden.

Modellrecherche und -auswahl

Im Ergebnis der durchgeführten Modellrecherche konnte kein Modell gefunden werden, welches alle energetischen Prozesse im Einzugsgebiet nachbildet, beginnend beim meteorologischen Geschehen und den Energieumsätzen an der Landoberfläche, weiter über die Wärmebewegung im Boden- und Grundwasserbereich bis zum Fließ- und Standgewässer mit deren spezifischen Energieumsätzen. Es werden jedoch alle relevanten Teilmodelle mit vorhandenen Modellen berücksichtigt, allerdings wurden die vorhandenen Modelle mit einer eigenen Zielstellung entwickelt, die nur einen Bereich einer ganzheitlichen integrier-

ten Betrachtung abdeckt. Viele Modelle, insbesondere Bodenwasser-, Grundwasser-, Fließgewässer- und Standgewässermodelle, betrachten jeweils nur ein Kompartiment. Darüber hinaus gibt es Modelle, welche sowohl die ungesättigte Zone (Bodenwasser) als auch die gesättigte Zone (Grundwasser) sowohl hydraulisch als auch thermisch nachbilden. Darüber hinaus gibt es zwar ganzheitliche Einzugsgebietsmodelle, die die hydrologischen Prozesse vom Boden bis zum Gewässer nachbilden, diesen fehlt jedoch die Möglichkeit einer prozessorientierten Berechnung der Wassertemperaturen. Bestenfalls wird die Interaktion zwischen Gewässer- und Grundwassertemperatur mit vereinfachten statistischen Ansätzen nachgebildet.

Insgesamt wird für die Weiterführung des Vorhabens empfohlen, bei der Modellierung schrittweise vorzugehen, wenn alle Kompartimente vom Bodenwasser bis zum Gewässer untersucht werden sollen. Eine Kopplung von Modellen wird nur für das Boden- und Grundwasser empfohlen und zur Reduzierung des Aufwandes nur in Form der Offline-Kopplung. Die Erkenntnisse zur Veränderung der Grundwassertemperatur können als Inputinformation für ein Gewässermodell dienen, welches aber letztlich relativ autark betrieben werden kann.

7 Literatur

- BAH (2009): Kurzbeschreibung des PSCN-Moduls in ArcEGMO. Büro für Angewandte Hydrologie. München (<http://www.arcegmo.de/html/pscn.html>)
- BARTHOLOW, J. M. (2000): The Stream Segment and Stream Network Temperature Models: A Self-Study Course. Open-File Report 99-112. U.S. Department of Interior, U.S. Geological Survey. Fort Collins, Colorado, May 2000. 278 S.
- BAUMGARTNER, A. (1967): Einfluß energetischer Faktoren auf Klima, Produktion und Wasserumsatz in bewaldeten Einzugsgebieten. Meteorologisches Institut der Forstlichen Forschungsanstalt, München.
- BERTHOLD, G., HERGESELL, M. (2005): Flächendifferenzierte Untersuchungen zu möglichen Auswirkungen einer Klimaänderung auf die Grundwasserneubildung in Hessen. Abschlussbericht für den Bereich Grundwasser. Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Wiesbaden. (www.hlug.de/klimawandel/inklim/dokumente/endberichte/grundwasserneubildung.pdf).
- BFÖS, C&E (2006): Auswirkungen des Klimawandels auf wasserabhängige Ökosysteme. Büro für ökologische Studien GdB, Consulting und Engineering GmbH, Chemnitz.
- BREMICKER, M. (2000): Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM – Modellgrundlagen und Anwendungsbeispiele. Freiburger Schriften zur Hydrologie, Band 11. Institut für Hydrologie der Universität Freiburg i. Br., 2000. 119 S.
- BURGMER, T., HILLEBRAND, H., PFENNINGER, M. (2007): Effects of climate-driven temperature changes on the diversity of freshwater macroinvertebrates. *Oecologia* 151: 93-103.
- CAISSIE, D. (2006): The thermal regime of rivers: a review. *Freshwater Biology* 51: 1389-1406.
- COLE, TH. M., WELLS, S. A. (2008): CE-QUAL-W2: A Two-Dimensional, Laterally Averaged, Hydrodynamic and Water Quality Model, Version 3.6. Supersedes Instruction Report E-95-1. U.S. Corps of Engineers, Vicksburg, 2008. 130 S.
- DAVIDSON, E. A., JANSSENS, I. A. (2006): Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature* 440: 165-173.
- DOKULIL, M., HAMM, A., KOHL, J. G. (Hrsg., 2001): Ökologie und Schutz von Seen. 1. Aufl., Wien: Facultas-Univ.-Verl., 499 S.
- DURANCE, I., ORMEROD, S. J. (2007): Climate change effects on upland stream macroinvertebrates over a 25-year period. *Global Change Biology* 13: 942-957.
- DVWK (1996): Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen. DVWK-Merkblatt 238. Offenbach/Main.
- DYCK, S., PESCHKE, G. (1989): Grundlagen der Hydrologie. Verlag für Bauwesen, Berlin.
- EATON, J. G., SCHELLER, R. M. (1996): Effects of climate warming on fish thermal habitat in streams of the United States. *Limnology & Oceanography* 41: 1109-1115.
- ERICKSON, T. R., MOHSENI, O., STEFAN, H. G. (1998): Estimation of an upper bound for weekly stream temperatures. Project Report No. 424, St. Anthony Falls Laboratory, University of Minnesota, 58 S.
- ERICKSON, T. R., MOHSENI, O., STEFAN, H. G. (1999): Required record length for a nonlinear weekly air-stream temperature regression model. Project Report No. 436, St. Anthony Falls Laboratory, University of Minnesota, 43 S.

- FAO (1998): Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) Irrigation and drainage paper 56. Rom(<http://www.fao.org/docrep/x0490e/x0490e00.htm>)
- FLEMMING, G. (2000): Angewandte Klimatologie von Sachsen. Basis- und Zustandsklima im Überblick. Tharandter Klimaprotokolle, Eigenverlag der TU Dresden, Dresden, 151 S.
- GERECKE, R., FRANZ, H. (2006): Quellen im Nationalpark Berchtesgaden. Lebensgemeinschaften als Indikatoren des Klimawandels. Nationalpark Berchtesgaden, Forschungsbericht 51: 1-272.
- HAAG, I., LUCE, A., BADDE, U. (2005): Ein operationales Vorhersagemodell für die Wassertemperatur im Neckar. Wasserwirtschaft 7-8/2005: 45-51.
- HAAG, I., LUCE, A. (2008): The integrated water-balance and water temperature model LARSIM-WT. Hydrological Processes 22: 1046-1056.
- HAFERKORN, U., MÜLLER, K., MELLENTIN, U., FAHL, J. (2003): Möglichkeiten und Grenzen der Stofftransportmodellierung (Nitrat) am Beispiel des Parthegebietes. UFZ-Bericht 14, 86 S.
- HERING, D., SCHMIDT-KLOIBER, A., MURPHY, J., LÜCKE, S., ZAMORA-MUNOZ, C., LOPEZ-RODRIGUEZ, M. J., HUBER, T., GRAF, W. (2009): Potential impact of climate change on aquatic insects: A sensitivity analysis for European caddisflies (Trichoptera) based on distribution patterns and ecological preferences. Aquatic Sciences 71: 3-14.
- IKSR (2009): Analyse des Kenntnisstands zu den bisherigen Veränderungen des Klimas und zu den Auswirkungen der Klimaänderung auf den Wasserhaushalt im Rhein-Einzugsgebiet. Literaturlauswertung. Internationale Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR), Koblenz. (www.iksr.org)
- JOHNSON, S. L. (2002): Stream temperature: scaling of observations and issues für modelling. Hydrological Processes 17: 497-499.
- JUNGHANS, H. (1969): Sonnenscheindauer und Strahlungsempfang geneigter Ebenen. Abhandlungen des Meteorologischen Dienstes der Deutschen Demokratischen Republik Nr. 85 (Band XI). Akademie-Verlag Berlin, 106 S.
- KAUSHAL, S. S., LIKENS, G. E., JAWORSKI, N. A., PACE, M. L., SIDES, A. M., SEEKELL, D., BELT, K. T., SECOR, D. H., WINGATE, R. L. (2010): Rising stream and river temperatures in the United States. *Frontiers in Ecology and the Environment*; doi:10.1890/090037.
- KLÖCKING, B., SUCKOW, F. (2003): Das ökohydrologische PSCN-Modul innerhalb des Flussgebietsmodells ArcEGMO. In: Pfützner, B. (Ed.): *Modelldokumentation ArcEGMO*. <http://www.arcegmo.de>.
- LFUG (2004): GIS-Datenfiles der sächsischen Naturräume. Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie. Nach: Bernhardt, A. et al.: *Naturräume der sächsischen Bezirke*. Sonderdruck aus den Heften 4/5. Hrsg.: Kulturbund der DDR, Dresden 1986. 84 S., mit Übersichtskarte 1 : 750.000
- LFUG (2008a): KliWEP – Abschätzung der Auswirkungen der für Sachsen prognostizierten Klimaveränderungen auf den Wasser- und Stoffhaushalt im Einzugsgebiet der Parthe - Teil 3: Vorstudie zur Simulation der Stoffflüsse von Stickstoff und Kohlenstoff im Parthe-Einzugsgebiet. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfUG) Dresden.
- LFUG (2008b): KliWEP - Abschätzung der Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt im Parthe-Einzugsgebiet. Abschlussbericht zum F&E-Vorhaben. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfUG), Dresden.
- LFULG (2009): Interaktives Kartenwerk. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG). http://www.umwelt.sachsen.de/de/wu/umwelt/lfug/lfug-internet/interaktive_karten.html. Stand September 2009.
- MEYER, J. L., SALE, M. J., MULHOLLAND, P. J., POFF, N. L. (1999): Impacts of climate change on aquatic ecosystem functioning and health. *Journal of the American Water Resources Association* 35: 1373-1386.
- MOHSENI, O., STEFAN, H.G. (1999): Stream temperature/air temperature relationship: a physical interpretation. *Journal of Hydrology* 218: 128-141.
- MORRILL, J. C., BALES, R. C., CONKLIN, M. H. (2005): Estimating stream temperature from air temperature: implications for future water quality. *Journal of Environmental Engineering* 131: 139-146.
- POOLE, G. C., BERMAN, C. H. (2001): An ecological perspective on in-stream temperature: natural heat dynamics and mechanisms of human-caused thermal degradation. *Environmental Management* 27: 707-802.
- RUBBERT, S. (2007): Entwicklung eines Langfristgewässergütemodells für flache Standgewässer. Dissertation, TH Aachen, 351 S.

- SMUL (Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft) (2005): Klimawandel in Sachsen, Sachstand und Ausblick 2005. 111 S. <http://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/klima/index.html>
- STAATLICHES UMWELTFACHAMT LEIPZIG (1998): Entwicklung der Beschaffenheit ausgewählter Fließgewässer im Regierungsbezirk Leipzig (1987-1997). Materialien zur Wasserwirtschaft, 152 S.
- SUCKOW, F. (1986): Ein Modell zur Berechnung der Bodentemperatur unter Brache und unter Pflanzenbestand. Dissertation, Akademie der Landwirtschaftswissenschaften der DDR, Berlin.
- TU DRESDEN (2008): Fachkonzept zur Berechnung des Wasserhaushalts für den Fest- und Lockergesteinsbereich in Sachsen mit dem Schwerpunkt Grundwasserhaushalt („Grundwasserhaushalt Sachsen“). Abschlussbericht. Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie (LfUG), Dresden.

Herausgeber:

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG)
Pillnitzer Platz 3, 01326 Dresden
Telefon: + 49 351 2612-0
Telefax: + 49 351 2612-1099
E-Mail: lfulg@smul.sachsen.de
www.smul.sachsen.de/lfulg

Autoren:

Ralf Löser, Dr. Petra Schneider, Nicole Gottschalk
C&E Consulting und Engineering GmbH
Jagdschänkenstr. 52, 09117 Chemnitz
Telefon: + 49 371 8814380
Telefax: + 49 371 8814589
E-Mail: info@cue-chemnitz.de

Heiko Ihling, Karin Kuhn; Dr. Bernd Spänhoff,
LfULG, Abteilung Wasser, Boden, Wertstoffe/Referat Oberflächen- und Grundwasser
Telefon: + 49 351 8928-4419
Telefax: + 49 351 8928-4099
E-Mail: bernd.spaenhoff@smul.sachsen.de

Redaktion:

Dr. Bernd Spänhoff, Heiko Ihling
LfULG, Abteilung Wasser, Boden, Wertstoffe/Referat Oberflächen- und Grundwasser

Titel:

Pegelstation Jänkendorf (mit kontinuierlicher Temperaturmessung) am Schwarzen Schöps (LfULG)

Redaktionsschluss:

10.11.2011

ISSN:

1867-2868

Hinweis:

Die Broschüre steht nicht als Printmedium zur Verfügung, kann aber als PDF-Datei unter <http://www.smul.sachsen.de/lfulg/6447.htm> heruntergeladen werden.

Verteilerhinweis

Diese Informationsschrift wird von der Sächsischen Staatsregierung im Rahmen ihrer verfassungsmäßigen Verpflichtung zur Information der Öffentlichkeit herausgegeben. Sie darf weder von Parteien noch von deren Kandidaten oder Helfern im Zeitraum von sechs Monaten vor einer Wahl zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für alle Wahlen.

Missbräuchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist auch die Weitergabe an Dritte zur Verwendung bei der Wahlwerbung. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die vorliegende Druckschrift nicht so verwendet werden, dass dies als Parteinahme des Herausgebers zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte.

Diese Beschränkungen gelten unabhängig vom Vertriebsweg, also unabhängig davon, auf welchem Wege und in welcher Anzahl diese Informationsschrift dem Empfänger zugegangen ist. Erlaubt ist jedoch den Parteien, diese Informationsschrift zur Unterrichtung ihrer Mitglieder zu verwenden.