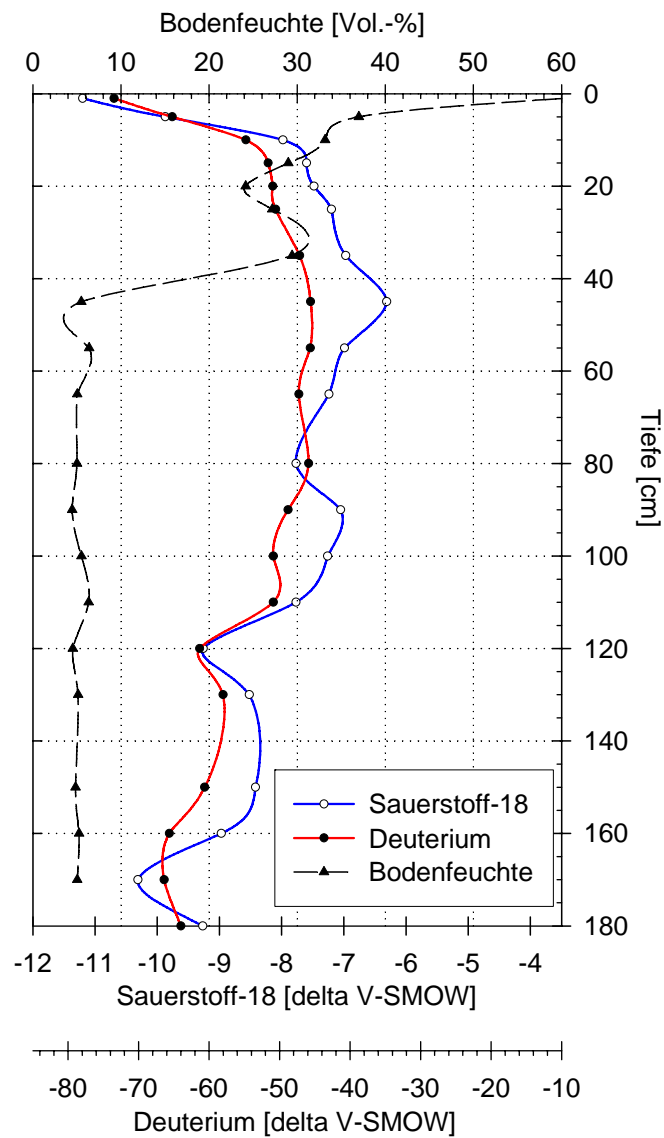


Steffen Holzkämper

## Isotopenhydrologische Ansätze zur Ermittlung der Evaporation aus dem Bodenspeicher im Hartheimer Kiefernwald



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

Steffen Holzkämper

**Isotopenhydrologische Ansätze zur Ermittlung  
der Evaporation aus dem Bodenspeicher  
im Hartheimer Kiefernwald**

Referent: Prof. Dr. Ch. Leibundgut

Koreferent: PD Dr. L. Jaeger

Betreuung: Dipl.-Hydr. P. Königer

Diplomarbeit unter der Leitung von Prof. Dr. Ch. Leibundgut  
Freiburg i. Br., April 2000

# Inhaltsverzeichnis

INHALTSVERZEICHNIS	I
VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN	IV
VERZEICHNIS DER TABELLEN	VII
ZUSAMMENFASSUNG	VIII
KEYWORDS	X
EXTENDED ENGLISH SUMMARY	XI
DANKSAGUNG	XIII
<b>1 EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG</b>	<b>1</b>
<b>2 ZIELSETZUNG</b>	<b>3</b>
<b>3 THEORETISCHE GRUNDLAGEN</b>	<b>5</b>
<b>3.1 Verdunstung</b>	<b>5</b>
3.1.1 Begriffsbestimmung	5
3.1.2 Verdunstung in Wasser- und Energiehaushalt	5
3.1.3 Quantifizierungsmöglichkeiten	7
<b>3.2 Bodenwasserbewegung</b>	<b>9</b>
3.2.1 Wasserbewegungen in der flüssigen Phase	9
3.2.2 Wasserbewegungen in der Gasphase	12
<b>3.3 Isotopenhydrologie</b>	<b>12</b>
3.3.1 Physikalische Grundlagen	13
3.3.2 Umweltisotope im Niederschlag	15
3.3.3 Umweltisotope in der ungesättigten Bodenzone	16
3.3.3.1 Versickerungsprozesse	17
3.3.3.2 Evaporation und Kondensation	18
3.3.3.3 Wechselwirkungen mit Pflanzenwurzeln und Bodensubstrat	20
<b>4 UNTERSUCHUNGSGEBIET</b>	<b>21</b>
<b>4.1 Geographische Lage</b>	<b>21</b>

<b>4.2</b>	<b>Geologie</b>	<b>21</b>
<b>4.3</b>	<b>Landschaftsentwicklung und Hydrologie</b>	<b>22</b>
<b>4.4</b>	<b>Hydrogeologie</b>	<b>23</b>
<b>4.5</b>	<b>Vegetation</b>	<b>23</b>
<b>4.6</b>	<b>Klimatische Verhältnisse</b>	<b>24</b>
<b>4.7</b>	<b>Böden</b>	<b>25</b>
	4.7.1 Substrat	25
	4.7.2 Bodentypen	26
	4.7.3 Bodenwasserhaushalt	28
<b>5</b>	<b>METHODIK</b>	<b>31</b>
<b>5.1</b>	<b>Untersuchung des Niederschlags</b>	<b>32</b>
<b>5.2</b>	<b>Untersuchung des Bodenwassers</b>	<b>33</b>
	5.2.1 Probenahme	33
	5.2.2 Bestimmung der Bodenfeuchte	33
	5.2.3 Extraktion des Bodenwassers	34
<b>5.3</b>	<b>Bestimmung der Verdunstung</b>	<b>36</b>
	5.3.1 SVERDRUP-Verfahren	36
	5.3.1.1 SVERDRUP-Formel	36
	5.3.1.2 Datengrundlage	37
	5.3.1.3 Fehlerquellen und Korrekturverfahren	38
	5.3.2 Verdunstungsmodell „TRAIN“	40
	5.3.2.1 Datengrundlage	40
	5.3.2.2 Modellbeschreibung	41
<b>6</b>	<b>ERGEBNISSE</b>	<b>43</b>
<b>6.1</b>	<b>Verdunstungssummen</b>	<b>43</b>
	6.1.1 SVERDRUP-Verfahren	43
	6.1.2 Verdunstungsmodell „TRAIN“	45
<b>6.2</b>	<b>Bodenwassergehalt</b>	<b>48</b>
<b>6.3</b>	<b>Isotopenkonzentrationen</b>	<b>51</b>
	6.3.1 Isotopengehalte im Niederschlag	51
	6.3.2 Isotopengehalte im Bodenwasser	53
<b>6.4</b>	<b>Fazit</b>	<b>59</b>

<b>7</b>	<b>DISKUSSION</b>	<b>61</b>
<b>7.1</b>	<b>Bestimmung der Verdunstung</b>	<b>61</b>
7.1.1	Vergleich der mit dem SVERDRUP-Verfahren und TRAIN ermittelten Verdunstung	61
7.1.2	Beurteilung der ermittelten Verdunstung	63
<b>7.2</b>	<b>Interpretation der Bodenwasserprofile</b>	<b>65</b>
7.2.1	Reaktionen der Bodenwasserprofile auf Niederschläge und Verdunstung	65
7.2.2	Deuterium / Sauerstoff-18-Relationen in der Deckschicht	72
7.2.3	Beurteilung von Grundwasserneubildung und Jahresverdunstung	74
<b>7.3</b>	<b>Fazit</b>	<b>77</b>
<b>8</b>	<b>SCHLUSSFOLGERUNGEN</b>	<b>79</b>
<b>9</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS</b>	<b>81</b>

## Verzeichnis der Abbildungen

<b>Abb. 3.1:</b> Einteilung der Verfahren zur Verdunstungsbestimmung mit Beispielen	8
<b>Abb. 3.2:</b> Ungesättigte Wasserdurchlässigkeit bei drei Bodenarten in Abhängigkeit von der Wasserspannung	10
<b>Abb. 3.3:</b> Externe Einflussfaktoren auf die Isotopenkonzentration des Bodenwassers	16
<b>Abb. 3.4:</b> Schematisches Profil eines Durchgangs von isotopisch markantem Bodenwasser bei Piston-flow-Verhältnissen	17
<b>Abb. 3.5:</b> Schematische Verteilung von Sauerstoff-18 bzw. Deuterium im Bodenwasser bei Sättigung	18
<b>Abb. 3.6:</b> Schematische Verteilung von Sauerstoff-18 bzw. Deuterium im Bodenwasser bei ungesättigtem Boden	19
<b>Abb. 4.1:</b> Geographische Lage der FMIF	21
<b>Abb. 4.2:</b> Schematisches Querprofil durch die Rheinaue in Höhe der FMIF	23
<b>Abb. 4.3:</b> Vegetation im Bereich des Untersuchungsgebiets	24
<b>Abb. 4.4:</b> Monatsmittelwerte der Lufttemperatur $T_a$ an der Wetterstation Bremgarten (1931-1960) und mittlere Monatssummen des Niederschlags $N$ an der FMIF (1974-1983)	25
<b>Abb. 4.5:</b> Häufigkeiten der Bodendeckschicht-Mächtigkeiten im Untersuchungsgebiet aus 1489 Bodenstichproben	26
<b>Abb. 4.6:</b> Bodenprofil an der FMIF: Zweischicht-Pararendzina nach Kalkpaternia	27
<b>Abb. 5.1:</b> Lage der Probenahmestellen und Messinstrumente im Bereich der FMIF	31
<b>Abb. 5.2:</b> Destillierapparatur zur azeotropen Bodenwasserextraktion	35
<b>Abb. 5.3:</b> Schema zum Aufbau des Verdunstungsmodells TRAIN	41
<b>Abb. 6.1:</b> Nach dem SVERDRUP-Verfahren berechnete Monatssummen der Verdunstung	43
<b>Abb. 6.2:</b> Nach dem SVERDRUP-Verfahren errechnete Tagessummen der Verdunstung von November 1997 bis Oktober 1999	44
<b>Abb. 6.3:</b> Exemplarischer Tagesgang der Verdunstung am 20. Mai 1998	45
<b>Abb. 6.4:</b> Tagessummen der Verdunstung, modelliert mit TRAIN, von November 1997 bis Oktober 1999	45

<b>Abb. 6.5:</b> Mit TRAIN korrigierter Freilandniederschlag in 15 m Höhe von November 1997 bis Oktober 1999	46
<b>Abb. 6.6:</b> Modellierte Bodenfeuchte im Untersuchungsgebiet von November 1997 bis Oktober 1999	47
<b>Abb. 6.7:</b> Modellierte Sickerung in den Kieskörper im Untersuchungsgebiet von November 1997 bis Oktober 1999	47
<b>Abb. 6.8:</b> Verlauf der Bodenfeuchte in verschiedenen Horizonten von Mai 1998 bis Februar 2000	48
<b>Abb. 6.9:</b> Vergleich der von meteorologischer und hydrologischer Seite gemessenen Bodenwassergehalte der Deckschicht von Mai 1998 bis Februar 2000	49
<b>Abb. 6.10:</b> Sauerstoff-18- und Deuteriumgehalte im Bestandsniederschlag sowie Monatssummen des Bestandsniederschlags von November 1997 bis Februar 2000	51
<b>Abb. 6.11:</b> Tageswerte und akkumulierte Tageswerte des Bestandsniederschlags zu Probenahmeterminen, Sauerstoff-18- und Deuteriumgehalte im Bestandsniederschlag	52
<b>Abb. 6.12 a.-l.:</b> Bodenwassergehalte, Deuterium- und Sauerstoff-18-Konzentrationen von Bodenprofilen zu verschiedenen Probenahmeterminen von August 1999 bis Januar 2000	54/55
<b>Abb. 6.13 a.-c.:</b> Bodenwassergehalte, Deuterium- und Sauerstoff-18-Konzentrationen von drei tiefen Bodenprofilen zu verschiedenen Probenahmeterminen	56
<b>Abb. 7.1:</b> Tagessummen der Verdunstung von November 1997 bis Oktober 1999, ermittelt durch das SVERDRUP-Verfahren und mit TRAIN	61
<b>Abb. 7.2:</b> Gegenüberstellung der mit dem SVERDRUP-Verfahren und mit TRAIN ermittelten Tagessummen der Verdunstung von November 1997 bis Oktober 1999	63
<b>Abb. 7.3:</b> Akkumulierte Niederschlags-Verdunstungs-Bilanz für die mit TRAIN und mit dem SVERDRUP-Verfahren ermittelte Verdunstung sowie die um 120 mm reduzierte TRAIN-Bilanz	64
<b>Abb. 7.4:</b> Wasserbilanz aus Freilandniederschlag und mit dem SVERDRUP-Verfahren bestimmter Verdunstung sowie gemessene Bodenwassergehalte von August 1998 bis November 1999	65
<b>Abb. 7.5 a.-l.:</b> Deuterium-Exzesse und Bodenwassergehalte von Bodenprofilen zu verschiedenen Probenahmeterminen	68/69
<b>Abb. 7.6:</b> Sauerstoff-18 / Deuterium-Beziehung im Bodenwasser in 0 – 2 cm, 0 – 20 cm und 20 – 40 cm Tiefe im Vergleich zur Local Meteoric Water Line	73

- Abb. 7.7:** Jahresgang der Steigungen der Sauerstoff-18 / Deuterium-Relationen im Bestandsniederschlag und im Bodenwasser unterschiedlicher Horizonte 74
- Abb. 7.8:** Deuterium-Exzesse und Bodenwassergehalte von tiefen Bodenprofilen an drei Probenahmeterminen 75



## Verzeichnis der Tabellen

<b>Tab. 3.1:</b> Porenraumgliederung und Porenfunktionen	11
<b>Tab. 4.1:</b> Profilbeschreibung der Pararendzina im Untersuchungsgebiet	27
<b>Tab. 4.2:</b> Porenvolumina und Porengrößenverteilung der Zweischicht-Pararendzina	28
<b>Tab. 5.1:</b> In TRAIN eingesetzte Angaben zum Standort „Hartheimer Kiefernwald“	40
<b>Tab. 7.1:</b> Vergleich der Monats- und Jahressummen der mit Sverdrup-Verfahren und TRAIN ermittelten Verdunstung	62
<b>Tab. 7.2 a.-k.:</b> Verdunstung, Bestandsniederschlag und Isotopengehalt im Bestandsniederschlag zwischen jeweils zwei Probenahmeterminen	66ff
<b>Tab. 7.3:</b> Regressionsgleichungen mit Bestimmtheitsmaß für die Sauerstoff-18 / Deuterium-Beziehung im Bodenwasser aus verschiedenen Horizonten und für die Local Meteoric Water Line des Bestandsniederschlags	73
<b>Tab. 7.4:</b> Aus Isotopenprofilen errechnete Grundwasserneubildung für verschiedene Zeiträume	76
<b>Tab. 7.5:</b> Durch das Sverdrup-Verfahren, das TRAIN-Modell und die Isotopenprofile ermittelten Grundwasserneubildungshöhen und Verdunstungssummen	77