

Eine Karte der aktuellen Verdunstung für das Tirol Atlas Gebiet anhand von Landnutzungs- und Vegetationsdaten

von

Michael Fecht, Bernhard Höfle, Reinhard Starnberger und Georg Kaser
Institut für Geographie, Universität Innsbruck

Zusammenfassung

Ausgehend von einem europaweiten Datensatz für Vegetations- und Landnutzungsklassen (CORINE Land Cover) und von Verdunstungswerten aus Messungen an verschiedenen Pflanzenbeständen sowie einer Karte der Schneedeckendauer (Fliri 1975a) wurde eine digitale Karte angefertigt, die für das Tirol Atlas Gebiet die jährliche aktuelle Gebietsverdunstung wiedergibt. Diese Karte enthält zusätzlich Punktinformationen über den Jahresgang der potentiellen Verdunstung. Die potentielle Verdunstung wurde mit vollständigen 30-jährigen Temperaturmessreihen (1961-1990) an 89 Stationen im Tirol Atlas Gebiet modelliert. Es zeigt sich, dass die potentielle Verdunstung im Wesentlichen temperaturabhängig ist und mit der Höhe abnimmt. Sonnseitig exponierte Stelle weisen höhere Werte auf als etwa nordseitige, ebenso wie intensiv genutzte landwirtschaftliche Flächen. Insgesamt nimmt die potentielle Verdunstung nach Süden hin zu, was mit der geographischen Breitenlage und dem zunehmenden submediterranen Einfluss zu erklären ist.

Inhalt

1	Einleitung	1
2	Vegetationstypenansatz	1
2.1	Methode.....	1
2.2	Vegetation	2
2.2.1	Corine Land Cover	2
2.2.2	Corine Land Cover Schweiz	2
2.2.3	Vorbereitung der Daten für die Modellierung.....	4
2.3	Dauer der Vegetationsperiode	5
2.3.1	Methodik.....	5
2.3.2	Die Dauer der Schneedecke (Karte D11 – Franz Fliri)	6
2.3.3	Digitalisieren der Karte D11	7
2.4	Klassifizierung der Verdunstungsmesswerte.....	8
2.5	Ergebnisse	9
3	Berechnung der potentiellen Verdunstung nach THORNTHWAITE	11
3.1	Methodik	11
3.2	Ansatz nach Thornthwaite (1948)	12
3.3	Arbeitschritte und Eingangsgrößen der Modellierung	12
3.3.1	Monatliche Mitteltemperatur.....	12
3.3.2	Anzahl der Tage des jeweiligen Monats.....	13
3.3.3	Wärmeindex I und empirischer Koeffizient a	13
3.3.4	Sonnenscheindauer.....	14
3.4	Ergebnisse	14
4	Diskussion	17
5	Literatur	18
	Anhang	

1 Einleitung

Im Rahmen des Projektmoduls Geoökologie und Raumforschung des Institut für Geographie der Universität Innsbruck im Studienjahr 2003/04 wird eine Wasserbilanzierung für das Gebiet des Tirol Atlas durchgeführt. Dabei werden die drei Wasserhaushaltsgrößen Abfluss, Niederschlag und Verdunstung bearbeitet. Als Bezugszeitraum liegt die 30-jährige Klimaperiode von 1961 bis 1990 zugrunde. Auf Basis dieser Klimaperiode wird mit 30-jährigen Monatsmittelwerten gearbeitet. Die folgenden Ausführungen befassen sich mit der Modellierung der Verdunstung. Zum einen wird die mittlere jährliche aktuelle Gebietsverdunstung, zum anderen eine punktuelle potentielle Verdunstung pro Monat ermittelt.

Für die Modellierung der Gebietsverdunstung wird ein empirischer Ansatz nach Broucek (1989) verwendet. Üblicherweise wird die Verdunstung während der Vegetationsperiode auf Messflächen von wenigen Quadratzentimetern bis Quadratmetern untersucht, da größere Flächen einen hohen technischen Aufwand erfordern. Die Erfahrung zeigt, dass man unter gewissen Vorbehalten Ergebnisse aus Verdunstungsmessungen auf einer Testfläche mehr oder weniger gut auf größere gleichartig bewachsene Flächen anwenden kann, um allgemeiner gültige Aussagen treffen zu können.

Der Vorteil im Vegetationsansatz liegt darin, dass mit der Karte der Vegetations- bzw. Landnutzungsklassen schon eine flächenhafte Darstellung zur Verfügung steht und eine komplizierte Interpolation umgangen werden kann. Die Rohdaten der Vegetationskartierung stammen aus dem CORINE Land Cover (CLC) Datensatz. Die Verdunstungswerte für verschiedene Pflanzenbestände werden der Literatur entnommen, wobei Broucek (1989) eine umfangreiche Sammlung an Messwerten bietet. Zusätzlich zu den Verdunstungsmesswerten und der Landnutzung fließt die Dauer der Vegetationsperiode in die Modellierung mit ein. Die Vegetationsperiode wird aus der Dauer der Schneedecke nach Fliri (1975a) abgeleitet.

Aufgrund der momentanen räumlichen und zeitlichen Auflösung der Eingangsdaten sollten die Untersuchungsgebiete die Größe des Einzugsgebietes Brixental (siehe Abb.3) nicht unterschreiten.

Die punktuelle Modellierung der potentiellen Verdunstung wird mit dem Ansatz von Thornthwaite (1948) durchgeführt. Im Vordergrund dabei steht der Verlauf der potentiellen Verdunstung im Jahresgang.

2 Vegetationstypenansatz

2.1 Methode

Mit dem Vegetationstypenansatz soll eine Möglichkeit geschaffen werden, die Gebietsverdunstung unabhängig von der hydrologischen Bilanz zu berechnen. Barry (1992) sieht die Verdunstung im Wesentlichen in Abhängigkeit von den Eigenschaften der umgebenden Luft und der Energiezufuhr zur Oberfläche. Sie ist vereinfacht das Ergebnis aus dem Zusammenspiel von Wasser- und Wärmehaushalt. Die Vegetation ist eng mit den herrschenden klimatischen, edaphischen und hydrologischen Bedingungen, die den Wasser- und Wärmehaushalt determinieren, verknüpft. Vegetation und Verdunstung sind also beide Ausdruck des Wasser- und Wärmehaushalts. Daraus lässt sich die Hypothese dieses Ansatzes ableiten, die die Verdunstungsmengen mit bestimmten Vegetationstypen in Beziehung setzt. Anhand vorhandener Vegetationskartierungen werden die Untersuchungsgebiete in die Vegetationstypen- bzw. Landnutzungsklassen bebaute Flächen, Kulturland, Wald, Zwergsträucher, Weiden/Matten, Ödland, Gletscher, Wasser-/Feuchtfächen (nach Broucek, 1989). Ziel des Ansatzes ist es, die mittlere jährliche Verdunstung eines gesamten Gebietes zu ermitteln.

Im Jahresverlauf nimmt die Vegetationsperiode für die Verdunstung eine wesentliche Rolle ein. In dieser Zeit wächst die Pflanze und es wird Wasser umgesetzt. Kaser (1985) und Broucek (1989) leiten die Vegetationsperiode von der Anzahl der Tage mit Schneebedeckung ab. Den Tagen mit Schneebedeckung wird pauschal eine einheitliche Verdunstungsrate für Schnee zugeordnet, den anderen Tagen werden die Verdunstungsraten der entsprechenden Vegetationstypen zugeordnet. Durch die Zahl der Tage mit Schneebedeckung und die Vegetationstypen- bzw. Landnutzungsklassen werden gleichzeitig klimatische und reliefbedingte Einflüsse auf die Verdunstung berücksichtigt. Die Verdunstungsraten der Vegetationstypen werden für die Vegetationsperiode mit den entsprechenden Flächen multipliziert und um die Verdunstungsraten der schneebedeckten Zeit ergänzt. Daraus kann die jährliche Gebietsverdunstung errechnet werden.

Das Ergebnis ist nicht für großmaßstäbige Darstellungen und detaillierte Fragestellungen geeignet und ist daher nur für Anwendungen in einem Maßstabbereich von Übersichtskarten und zeitlichen Mittelungen gedacht und sinnvoll.

2.2 Vegetation

2.2.1 Corine Land Cover

Die Modellierung der jährlichen Gebietsverdunstung für das Tirol Atlas Gebiet erfolgt auf Basis des CORINE Land Cover (CLC) Datensatzes. Trotz der niedrigen Auflösung von 250m wird der CLC Datensatz gegenüber anderen, die zwar eine höhere Auflösung haben jedoch nicht das gesamte Gebiet abdecken, bevorzugt. So ist eine einheitliche Behandlung des Tirol Atlas Gebietes möglich.

Das CLC Programm wurde von der Europäischen Union gegründet und umfasst den gesamten europäischen Raum und einige nordafrikanische Staaten, wobei mit der Bearbeitung verschiedene Stellen in den einzelnen Ländern beauftragt wurden.

Die Bodenbedeckung bzw. Landnutzung wurde entsprechend den Vorgaben der European Environment Agency (1993) im Arbeitsmaßstab 1:100000 auf der Basis von Landsat 5, TM Bildern durch computerunterstützte visuelle Fotointerpretation erhoben. Die Satellitenbilder wurden in Österreich zwischen 1985 und 1989 jeweils im Juli und August, in Deutschland in den Jahren von 1989 bis 1992 zwischen Mai und September und in Italien von 1990 bis 1993 zwischen Mai und Oktober aufgenommen. Für die Interpretation ist als kleinste Flächeneinheit 25ha und als kleinste Längeneinheit 100m festgelegt. Bei der Zuweisung der 44 CLC Klassen werden verschiedene Hilfsmittel wie Topographische Karten 1:50 000, Luftbilder und verschiedene thematische Karten verwendet.

Im CLC Datensatz sind die Klassen entsprechend Tabelle 1 vorgesehen (Nomenklatur). Die Klassen werden bei European Environment Agency (1993) näher beschrieben.

2.2.2 Corine Land Cover Schweiz

Die Schweiz weicht von der genannten Methodik ab. Sie hat eine eigene, auf Luftbildauswertungen basierende Landnutzungskartierung mit 69 Klassen in die CLC Nomenklatur umgewandelt. Die Luftbilder für die Erhebung stammen für den schweizerischen Teil des Tirol Atlas Gebietes aus dem Jahr 1985. Durch die unterschiedlichen Aufnahmemethoden und Aufnahmeklassen ist es jedoch schwierig, die 69 schweizerischen Klassen den CLC Level 3 Klassen zu zuordnen. Deshalb wurden die Kategorien der schweizerischen Landnutzungsstatistik mit den CLC Level 2 Klassen verknüpft. (Bundesamt für Statistik, 1998)

Gebietsverdunstung anhand von Landnutzungs- und Vegetationsdaten

CLC Level 1	CLC Level 2	CLC Level 3
1. Bebaute Fläche	1.1. Städtisch geprägte Flächen	1.1.1. durchgängig städtische Prägung 1.1.2. nicht durchgängig städtische Prägung
	1.2. Industrie-, Gewerbe- und Verkehrsflächen	1.2.1. Industrie/Gewerbeflächen 1.2.2. Straßen/Eisenbahnnetze, funktionell zugeordnete Flächen 1.2.3. Hafengebiete 1.2.4. Flughäfen
	1.3. Abbauflächen, Deponien, Baustellen	1.3.1. Abbauflächen 1.3.2. Deponien, Abraumhalden 1.3.3. Baustellen
	1.4. Künstlich angelegte nicht landwirtschaftlich genutzte Flächen	1.4.1. Städtische Grünflächen 1.4.2. Sport/Freizeitanlagen
2. Landwirtschaft	2.1. Ackerflächen	2.1.1. Nicht bewässertes Ackerland 2.1.2. Regelmäßig bewässertes Ackerland 2.1.3. Reisfelder
	2.2. Dauerkulturen	2.2.1. Weinbauflächen 2.2.2. Obst/Beerenobstbestände 2.2.3. Olivenhaine
	2.3. Grünland	2.3.1. Wiesen und Weiden
	2.4. Heterogene landwirtschaftliche Flächen	2.4.1. Einjähr. Kulturen in Verbindung mit Dauerkulturen 2.4.2. Komplexe Parzellenstruktur 2.4.3. Landwirtschaftlich genutztes Land mit Flächen natürlicher Vegetation von signifikanter Größe 2.4.4. Land/Forstwirtschaftliche Flächen
3. Wälder und naturnahe Flächen	3.1. Wälder	3.1.1. Laubwälder 3.1.2. Nadelwälder 3.1.3. Mischwälder
	3.2. Kraut/Strauchvegetation	3.2.1. Natürliches Grünland 3.2.2. Heiden und Moorheiden 3.2.3. Hartlaubbewuchs 3.2.4. Wald/Strauch Übergangsstadien
	3.3. Offene Flächen ohne oder mit geringer Vegetation	3.3.1. Strände, Dünen, Sandflächen 3.3.2. Felsflächen ohne Vegetation 3.3.3. Flächen mit spärlicher Vegetation 3.3.4. Brandflächen 3.3.5. Gletscher/Dauerschneegebiet
4. Feuchtflächen	4.1. Feuchtflächen im Landesinneren	4.1.1. Sümpfe 4.1.2. Torfmoore
	4.2. Feuchtflächen an der Küste	4.2.1. Salzwiesen 4.2.2. Salinen 4.2.3. In der Gezeitenzone liegende Flächen
5. Wasserflächen	5.1. Wasserflächen im Landesinneren	5.1.1. Gewässerläufe 5.1.2. Wasserflächen
	5.2. Meeresgewässer	5.2.1. Lagunen 5.2.2. Mündungsgebiete 5.2.3. Meer und Ozean

Tabelle 1: Corine Land Cover Nomenklatur (Umweltbundesamt, 5.6.2004).

2.2.3 Vorbereitung der Daten für die Modellierung

Im ersten Schritt müssen alle Datensätze in eine einheitliche Projektion gebracht werden. Entsprechend den anderen Karten des Tirol Atlas werden die Daten auf UTM 32 N (mit False Northing -5.000.000) projiziert.

Für die Modellierung müssen die CLC-Klassen zusammengefasst werden. Als Grundlage dient die Klasseneinteilung, die Broucek (1989) und Kaser (1985) verwendet haben. Entsprechend der folgenden Tabelle werden die CLC-Datensätze reklassifiziert, um für das Modell verwendet werden zu können.

EVA	Bezeichnung	Level1	Level2	Level3	DGM
1	Bebaute Flächen	1			
2	Kulturland	2			<=1500 m
				321	<=1500 m
3	Wald		31		
4	Zwergsträucher			322	
				323	
				324	
5	Weiden/Matten	2			> 1500 m
				321	> 1500 m
6	Ödland			331	
				332	
				333	
				334	
7	Gletscher			335	
8	Wasser-/Feuchtflächen	4			
		5			

Tabelle 2: Zuordnung der CLC-Klassen zu den Klassen der Verdunstungsmodellierung.

Durch die Verwendung der Schweizer CLC Daten treten Probleme bei der Klasse 7 (Gletscher) auf. Gletscher sind im CLC-Datensatz nur für den Level 3 vorgesehen und werden im Level 2 mit anderen Klassen zusammengefasst. Um für die Schweiz die notwendigen Informationen für diese Klasse zu erhalten, wird das Kartenblatt Landnutzung des Tirol Atlas herangezogen (Stumreich, 1997). Von dieser Vorlage werden die schweizerischen Gletscher digitalisiert und mit der entsprechenden Kodierung in den CLC-Datensatz eingebaut. Broucek (1989) und Kaser (1985) sehen eine Klasse hochgelegene Weiden und alpine Matten vor, die jedoch im CLC-Datensatz nicht vorhanden ist. Da diese Vegetationseinheit auf hohe Lagen beschränkt ist, werden die CLC-Klassen 2 (Landwirtschaft, Level 1) und 321 (Natürliches Grünland, Level 3) in zwei Höhenstufen unterteilt. Dabei werden die beiden CLC-Klassen unter 1500 m Seehöhe der Klasse 2, Kulturland und über 1500 m der Klasse 5, Weiden/Matten zugeordnet. Die Höheninformationen stammen von dem SRTM78 Datensatz (NASA, 2002).

Obwohl die Klassen und die Vorgehensweise von der European Environment Agency (1993) genauestens beschrieben wird, gibt es zwischen den Ländern Unterschiede in der Interpretation der Satellitenbilder. Derartige Unterschiede fallen vor allem an den Grenzen auf und soll am Beispiel Brennerautobahn gezeigt werden. Hier wird auf der italienischen Seite die Brennerautobahn erfasst,

auf der österreichischen hingegen nicht. Bei der Verarbeitung des Datensatzes für die Modellierung werden diese „Fehler“ vernachlässigt. Da die Autobahn in der Modellierung zur Klasse 1, bebaute Flächen, gehört, wird ihr der Verdunstungswert für diese Klasse zugeordnet.

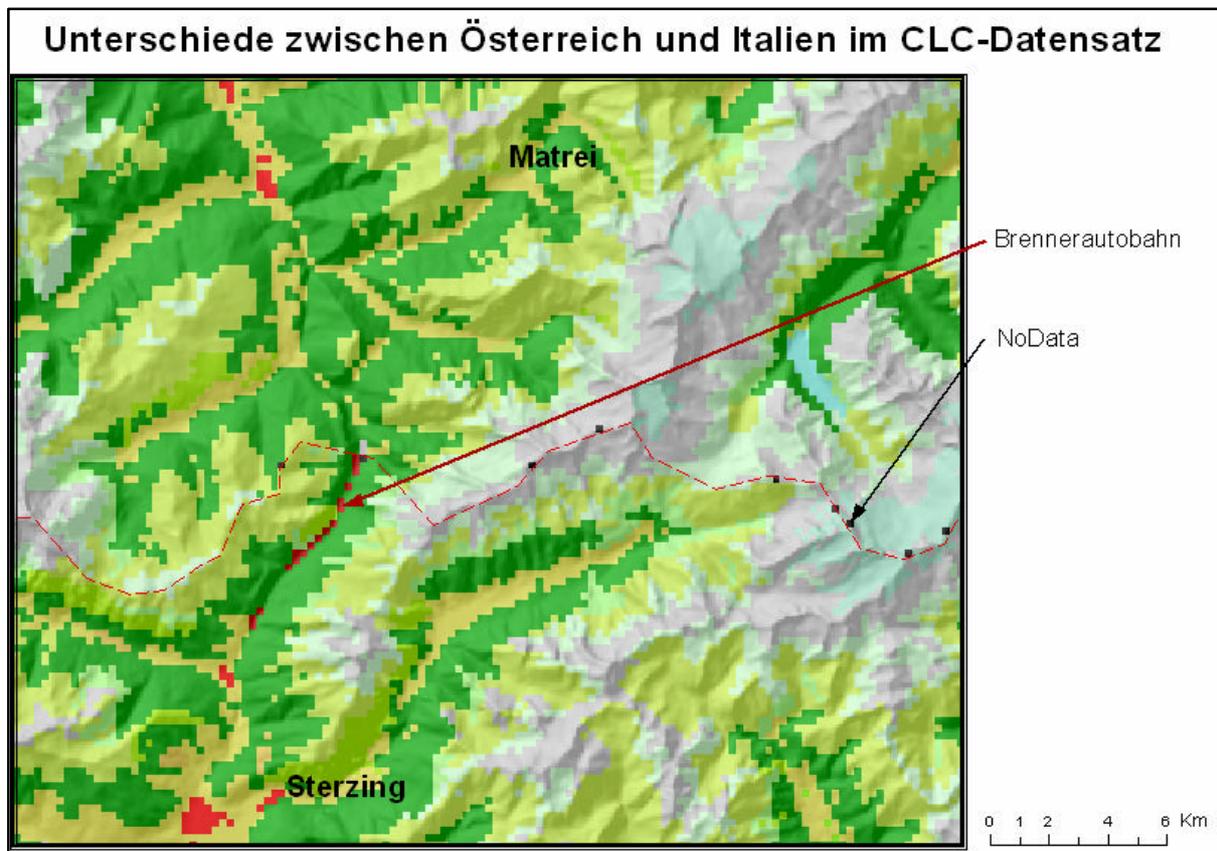


Abbildung 1: Unterschiede zwischen den Ländern im CLC-Datensatz.

Im CLC-Datensatz fällt auf, dass an den Grenzen zwischen den beteiligten Ländern immer wieder Bereiche ohne Zuordnung (NoData) auftreten. Diese Bereiche werden mit dem Wert einer Nachbarzelle aufgefüllt.

Das Ergebnis ist eine Karte mit den 8 Landnutzungs- bzw. Vegetationsklassen. Dieser Karte können nun tägliche Verdunstungsraten zugeordnet werden.

2.3 Dauer der Vegetationsperiode

2.3.1 Methodik

Ein Datensatz über die Dauer der Vegetationsperiode ist nicht vorhanden, weshalb sie aus der Dauer der Schneebedeckung abgeleitet wird. Dabei wird angenommen, dass die Vegetationsperiode der schneefreien Zeit im Jahr entspricht. Aus zeitlichen Gründen ist eine Modellierung der Schneedeckendauer im Rahmen des Projektmoduls nicht möglich. Der Datensatz von Fliri (1975a), der sich auf die Klimaperiode 1931-60 bezieht und nur ca. 90% des Tirol Atlas Gebietes abdeckt, wird als beste verfügbare Datengrundlage angesehen. Fliris Karte ist eine Isolinienkarte, die die Dauer der Schneebedeckung in Monaten angibt. Für die Modellierung der Gebietsverdunstung wird die Dauer der Vegetationsperiode in Tagen [d] benötigt. Dafür ist es notwendig, den Klassen von Fliri eine Anzahl der Tage zuzuweisen. Zur Vereinfachung wird angenommen, dass ein Monat 30 Tage hat. Der Klasse wird dann die Anzahl der Tage der Klassenmitte zugeordnet (siehe Tab.3)

Monate mit Schneebedeckung	Tage
< 1	15
1-2	45
2-3	75
3-4	105
4-5	135
5-6	165
6-7	195
7-8	225
8-9	255
9-10	285
> 10	330

Tabelle 3: Zuordnung der Tage mit Schneebedeckung zu den Klassen von Fliri (1975a).

2.3.2 Die Dauer der Schneedecke (Karte D11 – Franz Fliri)

Den Karten von Franz Fliri zu den Schneebedingungen liegt die Beobachtungsperiode 1. Oktober 1930 bis 31. Mai 1960 zugrunde. Dabei verwendet wurden Daten über den Beginn und das Ende der Schneedecke, der dauernden Winterschneedecke, aber auch Daten über die maximalen Schneehöhen und die summierten Neuschneehöhen. Zur Verfügung standen 512 Messstationen, die sehr unterschiedlich regional sowie über die Höhenstufen verteilt waren (siehe Fliri, 1975b). Die unterschiedlichen Quellenlagen (siehe Tab.4) in den einzelnen Ländern des Tirol Atlas Gebietes führten zu einer Beschränkung der Darstellung der Schneebedingungen auf die relative Häufigkeit des Vorhandenseins einer Schneedecke an wenigen ausgewählten Tagen sowie auf die mittleren und maximalen Schneehöhen.

Deutscher Wetterdienst (Deutschland)	Schneehöhen für jeden Tag ? Dauer der Schneebedeckung
Servizio Idrografico (Italien)	Schneehöhenangaben für 10., 20. und monatsletzten Tag, ? Dauer der Schneebedeckung erst seit 1952/53
Hydrographisches Zentralbüro (Österreich)	Schneehöhen für jeden Tag, Mittelwerte des Beginns und Ende einer Schneedecke ? Dauer der Schneebedeckung

Tabelle 4: Datengrundlagen in den einzelnen Tirol Atlas Ländern (verändert nach Fliri 1975b).

Die Angabe von Beginn und Ende einer Schneedecke, als auch die Angabe von Schneehöhen an Stichtagen, haben umso weniger Aussagekraft, je veränderlicher und episodischer die Schneedecke an einem Ort auftritt. Vor allem in den tiefergelegenen Tälern kann dies zu fehlerhaften Werten führen. Durch die Ermittlung der Häufigkeit des Vorhandenseins einer Schneedecke von mindestens 1 cm am 10., 20. und monatsletzten Tag von Oktober bis Mai konnte ein einheitliches Berechnungsschema geschaffen werden. Jedem Stichtag wurden die vorausgehenden und nachfolgenden Tage zugeschrieben. Die Anzahl der Tage zwischen den Stichtagen wurde somit halbiert. Die untere Hälfte der Tage wurde dem vorausgehenden Stichtag und die obere Hälfte dem nachfolgenden Stichtag zugewiesen, was ungefähr der Multiplikation des Stichtages mit dem Faktor 10 entspricht. Diese Methode konnte im österreichischen Gebietsteil mit den gemessenen Werten (Schneehöhen für jeden Tag) verglichen werden und es ergab sich eine geringe Überschätzung der Dauer um ca. 3 %, wenn

Nördliche Randzone	10,7 Tage / 100 m
45 km vom Alpennordrand	8,8
75 km vom Alpennordrand	8,9
Zentralzone	7,7
75 km vom Alpensüdrand	9,1
45 km vom Alpensüdrand	8,9
Südlichste Randzone	9,5

Tabelle 5: Höhenbedingte Zunahme der Schneedeckendauer zwischen 500 bis 2000 m Seehöhe (verändert nach Fliri 1975b).

man die Höhenstationen ausscheidet. Der Datenbestand des italienischen Gebietsteils, der größtenteils Messungen an Stichtagen vorwies, wurde auf gleiche Weise korrigiert.

Die Auftretenshäufigkeit einer Schneedecke hängt in erster Linie von der Jahreszeit und Seehöhe, sowie von der Lage im nord-südlichen Querprofil der Alpen, der Exposition, der Gestalt des Geländes, der Bodenbeschaffenheit und der Vegetationsdecke ab. (siehe Tab.5 und Tab.6)

Fliri nutzte zur Erstellung der flächigen Darstellung die Abhängigkeit der punktuell vorliegenden Durchschnittswerte bzw. Häufigkeiten zur Seehöhe. Diese regionalen Gesetzmäßigkeiten stellten eine zusätzliche Information und unentbehrliche Hilfe beim Entwerfen der Karte dar.

Der gegebene Kartenmaßstab von 1:600.000 und die Betrachtung des mittleren Zustandes im 30-jährigen Zeitraum 1930/31 – 1959/60 erlauben keine Aussage über die kleinräumigen Unterschiede in der Schneedeckenverteilung. Große Unterschiede in der Dauer der Schneebedeckung an den Messstationen sind aber auch in den einzelnen Jahren zu vermerken.

Station	Höhe m	Minimum Tage	Mittlere Dauer Tage	Maximum Tage	Stand.-abweichung Tage	Variabilität %
Oberstdorf	813	90	118	180	21	18
Innsbruck-Universität	582	10	76	120	29	38
Brenner	1371	90	139	180	24	17
Marienberg	1355	50	108	170	27	25
Sterzing	945	10	78	140	31	40
Brixen	560	0	48	80	31	64
Trient	312	0	51	100	34	66
Padua	12	0	31	40	28	90

Tabelle 6: Veränderlichkeit der Dauer der Schneebedeckung von Oktober bis Mai in der Periode 1930/31 - 1959/60 an ausgewählten Stationen (verändert nach Fliri 1975b).

2.3.3 Digitalisieren der Karte D11

Die Strichvorlage für die Karte D11 wird im Schwarz-Weiss-Modus eingescannt. Diese gerasterte Vorlage der Grenzlinien zwischen Flächen gleicher Schneedeckendauer werden im Programm ARC/INFO (ESRI) automatisiert in Vektoren („polylines“) umgewandelt. Nach einer arbeitsaufwändigen Bereinigung der vektorisierten Linien kann die Topologie aufgebaut werden, d.h. geschlossene Linienzüge werden als Flächen („polygons“) ausgewiesen. Nachdem die Geometrie der

Karte steht, werden den einzelnen Flächen die Attributwerte (Klassen für die Dauer der Schneebedeckung: siehe Tab.7) zugewiesen.

Klasse im Shapefile	Klassifikation in der Karte D11 [Monate mit Schneebedeckung]
0	< 1
1	1-2
2	2-3
3	3-4
4	4-5
5	5-6
6	6-7
7	7-8
8	8-9
9	9-10
10	> 10

Tabelle 7: Klassifikation der Dauer der Schneedecke.

2.4 Klassifizierung der Verdunstungsmesswerte

Um die Anzahl der Tage der Vegetationsperiode, die aus der Dauer der Schneebedeckung abgeleitet wird, mit Verdunstungswerten (in mm/d) zu kombinieren, benötigt man entsprechende Messwerte aus der Literatur und aus anderen Quellen. Solche Werte sind nicht ganz einfach zu finden, da Verdunstungsmessungen an Pflanzen von Botanikern und Ökologen in der Regel am Einzelindividuum oder an einem kleinen Bestand durchgeführt wird, um genaue Kenntnisse über Energiehaushalt und Mikroklima zu gewinnen. Besonders für Waldgebiete, die einen großen Teil des Untersuchungsgebietes ausmachen, liegen kaum Untersuchungen vor, da sich die Verdunstungsmessung an einem solchen Bestand als äußerst schwierig erweist. Es gibt allerdings Untersuchungen zur Verdunstung von Einzelbäumen, die jedoch eine begrenzte Aussagekraft besitzen, da sich die Verdunstung von Einzelbaum und Bestand deutlich unterscheidet (Abschattung im Wald).

In der Diplomarbeit von Broucek (1989) liegt eine gründliche Sammlung von Verdunstungswerten aus dem Alpenraum bzw. anderen Teilen Europas aus der Zeit ab Mitte des 20. Jahrhunderts bis 1989 vor. Weitere Werte, die in der hier vorgestellten Arbeit verwendet werden, stammen aus Diplomarbeiten am Institut für Botanik, Abteilung Ökologie der Universität Innsbruck (Hofer, 1995; Salchner, 1997; Sapinsky, 2001) und aus bisher unveröffentlichten Forschungsarbeiten, die freundlicherweise von Dr. Newesely vom Institut für Botanik der Universität Innsbruck zur Verfügung gestellt wurden (s. Anhang). Dabei wurden vor allem verschiedene Gras- und Zwergstrauchbestände untersucht. Alle Quellen ergeben insgesamt eine Sammlung von 121 Einzelwerten, die weiter aufbereitet werden. Zunächst werden alle Werte acht Vegetationsklassen zugeordnet, die im Wesentlichen eine Höhenstufung darstellen, wobei die Klasseneinteilung von Broucek (1989) als Vorlage dient. Die acht Klassen sind:

- bebaute Flächen
- Kulturland
- Wald
- Zwergsträucher
- Weiden/Matten
- Ödland
- Gletscher
- Wasser-/Feuchflächen

Für städtische Gebiete bzw. größere Siedlungsflächen wie etwa Industriegebiete liegen keine Werte aus der Literatur vor. Unter der Annahme, dass versiegelte Flächen nahezu das gesamte Niederschlagswasser verdunsten, außer bei Starkregen und länger anhaltenden Regenereignissen, kann die aktuelle Verdunstung in Stadtgebieten als potentielle Verdunstung an Tagen mit Niederschlag angesehen werden. Für die Städte Landeck, Innsbruck, Kufstein, Lienz und Bozen sind die potentielle Verdunstung (nach Thornthwaite) in der Vegetationsperiode und die Anzahl der Tage mit mindestens 1 mm Niederschlag bekannt. Daraus lässt sich ein Mittelwert für die tägliche Verdunstungshöhe in Stadtgebieten während der Vegetationsperiode berechnen.

Die Werte für Kulturland und Wiesen werden in zwei Klassen unterteilt, nämlich in Tallagen und Hochlagen, da von unterschiedlichen Verdunstungswerten je nach Meereshöhe ausgegangen werden muss. Es wird eine Höhengrenze von 1500 m festgelegt, über der sich die Klasse 5, Wiesen (Hochlagen) befindet. Ödland bezeichnet vegetationsarme bzw. vegetationslose Gebiete in der subnivalen und nivalen Stufe, wie Schuttfluren und Felsregionen. Für Wasserflächen liegt lediglich ein einziger Verdunstungswert vor, woraufhin diese Klasse (zusammen mit den Siedlungsflächen) nicht weiter statistisch ausgewertet wird. Alle übrigen Klassen werden, um letztlich einen einzigen Wert für jede Klasse zu erhalten, in einem weiteren Schritt ausgewertet, indem in jeder Klasse die Extrema (Maximum- und Minimumwert) entfernt werden, da sie teilweise als statistische Ausreißer anzusehen sind; dann werden Mittelwert und Standardabweichung für jede Klasse berechnet, um schließlich für jede Klasse einen Mittelwert aus allen Verdunstungswerten zu erhalten, ebenso wie eine minimale mittlere Verdunstung (Mittelwert minus Standardabweichung) und eine maximale mittlere Verdunstung (Mittelwert plus Standardabweichung). Die Ergebnisse der Berechnung sind in Tab. 8 zu sehen:

Vegetationsklasse	Mittelwert	M - StAbw	M + StAbw
	mm/d		
1. bebaute Fläche	1	0,78	1,22
2. Landwirtschaft	2,55	1,78	3,32
3. Wald	2,01	1,09	2,92
4. Zwergsträucher	2,77	1,42	4,11
5. Weiden/Matten	3,66	2,26	5,06
6. Ödland	1,71	0,77	2,66
7. Gletscher	0,21	0,03	0,39
8. Wasser-/Feuchtflächen	2,58	2,58	2,58

Tabelle 8: Mittlere, höchste mittlere (M + StAbw) und niedrigste mittlere (M – StAbw) Verdunstung während der Vegetationsperiode in mm pro Tag.

2.5 Ergebnisse

Als Zwischenergebnis ergibt sich eine Rasterkarte (250m) der mittleren jährlichen aktuellen Verdunstung. Diese Karte gibt das erwartete räumliche Verteilungsmuster wieder. Die Abnahme der Verdunstung mit der Höhe und die Zunahme der Verdunstung südlich des Alpenhauptkammes sind deutlich zu erkennen. In einem N-S-Profil vom mittleren Inntal zum Etschtal zeigen sich die oben genannte Verteilung sehr gut (Inntal: ca. 700 mm/a, Alpenhauptkamm: <100 mm/a, Etschtal: >800 mm/a).

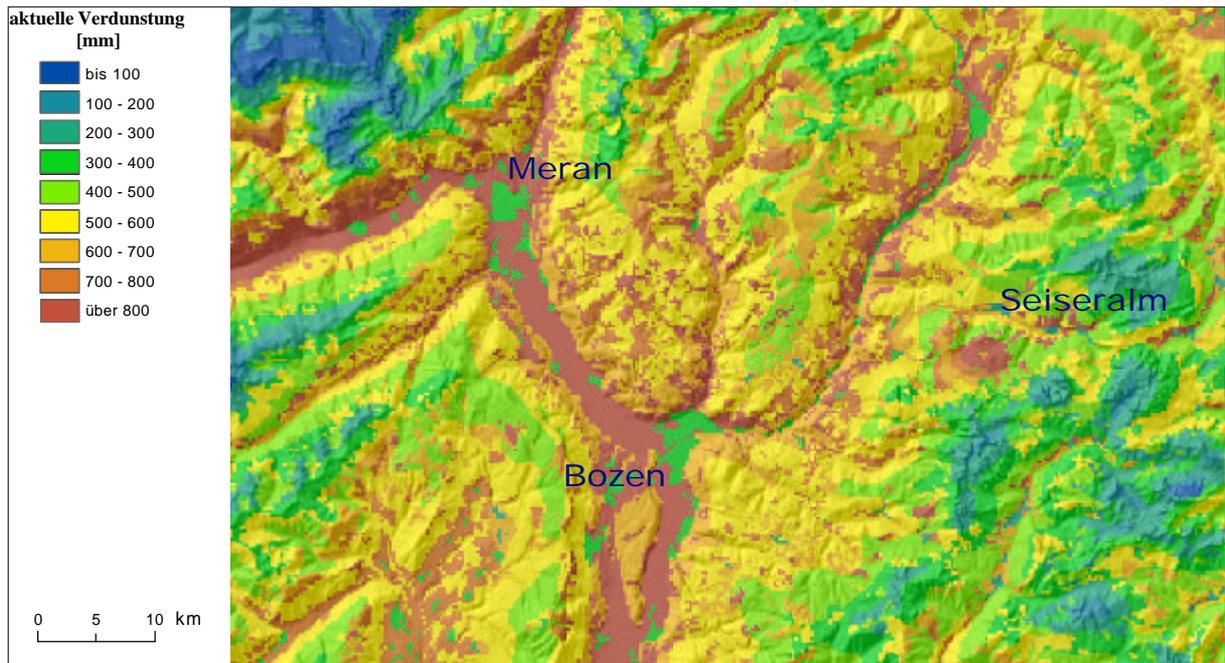


Abbildung 2: Einfluss der Höhe und der Vegetation auf die Verdunstung.

Als Folge der Modellierung mit den Eingangsgrößen Verdunstungswert je Landnutzungs- und Vegetationsperiode lässt sich für jede Rasterzelle die dominierende Eingangsgröße angeben. So heben sich die Verdunstungswerte der Seiseralm (große Almfläche) aufgrund der höheren Verdunstungsraten von Weiden und Matten deutlich von den umgebenden Wald- und Zwergstrauchflächen ab (siehe Abb.2). Ferner ist innerhalb dieser homogenen Fläche der Höhengradient, der im Wesentlichen durch die Dauer der Vegetationsperiode bestimmt wird, zu erkennen.

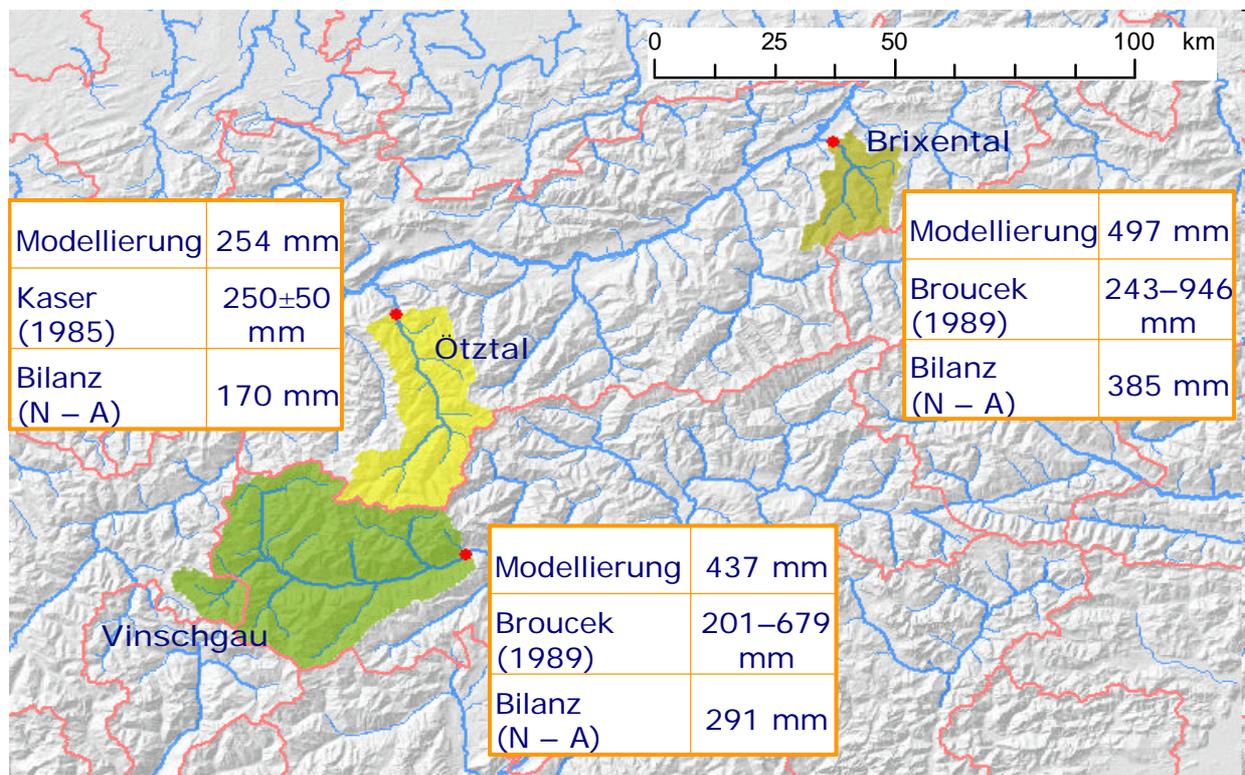


Abbildung 3: Vergleich der Gebietsverdunstung

Aus dem Zwischenergebnis, dem Verdunstungsraster, wird für große Einzugsgebiete die mittlere jährliche Gebietsverdunstung berechnet. Für das Brixental, das Ötztal und den Vinschgau kann das Ergebnis mit den Arbeiten von Broucek (1989) und Kaser (1985), sowie der Verdunstung als Restglied der Wasserhaushaltsgleichung (Niederschlag minus Abfluss des Projektmoduls), verglichen werden (siehe Abb.3). Der berechnete Mittelwert der mittleren jährlichen Gebietsverdunstung liegt sehr gut im Schwankungsbereich der Werte, die Broucek (1989) mit dem Vegetationstypenansatz berechnet hat. Die Spannweiten (siehe Tab.9) für die zwei Einzugsgebiete Brixental und Vinschgau sind geringer als bei Broucek (1989) und grenzen das Ergebnis besser ein. Die Abweichung zum Verdunstungswert, den Kaser (1985) für das Ötztal aus der Wasserbilanz gerechnet hat, ist ebenfalls sehr gering (siehe Abb.3).

	Schwankungsbereich	Mittelwert	Schwankungsbereich Broucek (1989)
Brixental	268 – 723 mm	497 mm	243 – 946 mm
Ötztal	109 – 398 mm	254 mm	-
Vinschgau	250 – 692 mm	437 mm	201 – 679 mm

Tabelle 9: Modellierte Schwankungsbereiche und Mittelwerte im Vergleich zu Broucek (1989).

Im Vergleich mit der Wasserbilanz des Projektmoduls zeigen sich große Abweichungen von bis zu 150 mm vom Mittelwert. Dies läßt sich durch die großen Fehler in der Niederschlagsmessung und den Unsicherheiten in der Modellierung des Gebietsniederschlages erklären.

Der Hydrologische Atlas der Schweiz (HADES) verfügt über ein sehr komplexes prozessorientiertes Modell für die Berechnung der Gebietsverdunstung. Vergleicht man die Gebietsverdunstung des Tirol Atlas Gebietes mit der Gebietsverdunstung der Schweiz (vgl. HADES), so erhält man ähnliche Werte (Tirol Atlas Gebiet: 454 mm, Schweiz: 484 mm). Das Tirol Atlas Gebiet und die Schweiz sind von ihrer naturräumlichen Ausstattung und in Folge von ihrer Gebietsverdunstung vergleichbar.

3 Berechnung der potentiellen Verdunstung nach THORNTHWAITE

3.1 Methodik

Für die Modellierung der potentiellen Verdunstung der 30-jährigen Klimaperiode 1961-1990 wird der empirische Ansatz von Thornthwaite (1948) verwendet. Thornthwaite (1948) beschränkt sich auf die Lufttemperatur in monatlicher Auflösung als einzige meteorologische Eingangsgröße. Andere empirische Ansätze, wie zum Beispiel der Ansatz nach Penman (1948), benötigen zusätzliche meteorologische Informationen über die relative Luftfeuchtigkeit, die Windgeschwindigkeit und die Strahlungsbilanz an einem Ort. Die Darstellung der potentiellen Verdunstung im jahreszeitlichen Verlauf (auf Monatsbasis) ist beim Ansatz von Thornthwaite (1948) gegeben.

Der folgende Text erläutert das gewählte Berechnungsverfahren, zeigt die einzelnen Arbeitsschritte auf und geht in Form einer kurzen Interpretation auf die Ergebnisse ein.

3.2 Ansatz nach Thornthwaite (1948)

In diesem einfachen Ansatz sind die monatliche Mitteltemperatur der Luft und die mittlere tägliche astronomisch mögliche Sonnenscheindauer des Monats die einzigen Eingangsgrößen. Basierend auf einen empirischen Zusammenhang zwischen potentieller Verdunstung und Temperatur gilt:

$$E_{p,mon} = 0,533 \cdot n \cdot \frac{S_0}{12} \cdot \left(\frac{10 \cdot \bar{T}_{mon}}{I} \right)^a \quad (1)$$

$E_{p,mon}$	monatliche potentielle Verdunstung
\bar{T}_{mon}	monatliche Mitteltemperatur
S_0	mittlere tägliche astronomisch mögliche Sonnenscheindauer des jeweiligen Monats
n	Anzahl der Tage des jeweiligen Monats
I	Wärmeindex für das Jahr
a	empirischer Koeffizient

Daraus lassen sich die mittleren Verdunstungshöhen der Monate errechnen. S_0 , der aufsummierte monatliche Wärmeindex I und der empirische Koeffizient a müssen für jeden Standort ermittelt werden. Die monatliche Mitteltemperatur und die Sonnenscheindauer S_0 ändern sich für jeden Monat, I und a gelten für das gesamte Jahr. Durch die Koeffizienten fließt eine Gewichtung der Monatsmitteltemperatur in die Formel mit ein:

$$I = \sum_1^{12} \left(\frac{\bar{T}_{mon}}{5} \right)^{1,514} \quad (2)$$

und

$$a = (0,0675 \cdot I^3 - 7,71 \cdot I^2 + 1792 \cdot I + 49239) \cdot 10^{-5} \quad (3)$$

Der Quotient $S_0/12$ dient als monatlicher Korrekturfaktor für die Sonnentageslänge und kann im Tirol Atlas Gebiet Werte zwischen ca. 0,69 (~ 8,3h) im Dezember bis 1,31(~ 15,7h) im Juni annehmen. Die genaue Berechnung und Verwendung von S_0 wird im Kapitel Arbeitsschritte erklärt.

3.3 Arbeitsschritte und Eingangsgrößen der Modellierung

Die Temperaturmessdaten werden in einer PostgreSQL 7.4 Datenbank verwaltet. Die Weiterverarbeitung der Daten wird mit Hilfe von Datenbankabfragen, GIS-Software (GRASS, ARC/INFO, ArcGIS) und eigenen Skripts (Programmiersprachen PHP und Python) durchgeführt.

3.3.1 Monatliche Mitteltemperatur

Für die punktuelle Modellierung der potentiellen Verdunstung werden alle Lufttemperaturmessstationen des Tirol Atlas Gebietes, die eine lückenlose Reihe von 1.1.1961 bis 31.12.1990 aufweisen, herangezogen. Im gesamten Untersuchungsgebiet sind dies 89 Stationen.

In Italien wird die tägliche Mitteltemperatur im Gegensatz zu den anderen Ländern des Tirol Atlas Gebietes aus $(T_{max}+T_{min})/2$ berechnet. Der Vergleich der unterschiedlichen Temperaturmittelbildungen in der Arbeit von Siogas (1972) liefert monatliche Korrekturwerte (vgl. Tab.10) und ermöglicht somit eine Anpassung der italienischen Werte an das Temperaturmittel aus $(T7 + T14 + 2*T21)/4$, das in Österreich und Deutschland angewandt wird.

Monat	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Abweichung in °C	0,09	0,17	0,37	0,38	0,4	0,6	0,97	0,88	0,62	0,45	0,3	0,08

Tabelle 10: Abweichung von $(T_{max}+T_{min})/2$ zu $(T7 + T14 + 2*T21)/4$ (Siogas 1972).

Tmax...Tagesmaximum der Lufttemperatur

Tmin...Tagesminimum der Lufttemperatur

T7...Lufttemperatur gemessen um 7.00 Uhr, T14...14.00 Uhr, T21...21.00 Uhr

Nach der Korrektur der Werte aus den italienischen Tirol Atlas Gebieten wird das 30-jährige Mittel (1961-1990) der Temperatur für jeden Monat bestimmt.

3.3.2 Anzahl der Tage des jeweiligen Monats

Die Tage pro Monat (Jänner bis Dezember) fließen direkt in die Berechnung mit ein. Es wird angenommen, dass das Jahr 365 Tage (Februar mit 28 Tagen) hat.

3.3.3 Wärmeindex I und empirischer Koeffizient a

Der Wärmeindex I wird in einem Zwischenschritt für jeden Monat (I_{mon}) berechnet und danach werden die monatlichen Werte der Stationen auf das Jahr summiert (siehe Formel 2). Diese Jahressumme (I) ist die einzig veränderbare Eingangsgröße für die Ermittlung von a (siehe Formel 3). Bei negativen Temperaturen wird I_{mon} auf Null gesetzt ($T_{mon} < 0 ? I_{mon} = 0 ? E_{p,mon} = 0$), was ein Aussetzen der Verdunstung ($E_{p,mon} = 0$) zur Folge hat. (siehe Tab.11)

Die Berechnung wird in der Datenbank ausgeführt (SQL-Statements sind im Appendix nachzulesen).

Monat	Innsbruck (Universität) 577m		Langen am Arlberg 1218m		Schopernau 835m	
	Tmon	Imon	Tmon	Imon	Tmon	Imon
1	-1,71	0	-2,47	0	-4,13	0
2	0,61	0,122	-2,02	0	-2,62	0
3	4,58	0,916	0,07	0,014	0,44	0,088
4	8,78	1,756	3,13	0,626	4,33	0,866
5	13,24	2,648	8,05	1,61	9,39	1,878
6	16,24	3,248	11,26	2,252	12,61	2,522
7	17,93	3,586	13,59	2,718	14,71	2,942
8	17,24	3,448	13,13	2,626	13,9	2,78
9	14,27	2,854	10,79	2,158	11,15	2,23
10	9,31	1,862	7,3	1,46	6,82	1,364
11	3,33	0,666	1,56	0,312	0,87	0,174
12	-1,27	0	-1,58	0	-3,43	0

Tabelle 11: Monatsmitteltemperaturen (T_{mon}) und monatliche Wärmeindizes (I_{mon}) für 3 ausgewählte Stationen (siehe Appendix).

3.3.4 Sonnenscheindauer

Der Ansatz nach Thornthwaite sieht die Verwendung der mittleren täglichen astronomisch mögliche Sonnenscheindauer des jeweiligen Monats vor. Auf diesen Wert sind auch die empirischen Koeffizienten abgestimmt. Das Tagesmittel der Sonnenscheindauer je Monat wird mit 4 Terminwerte pro Monat gebildet. Und zwar ist dies immer der 1., 10., 19. und 28. Tag im Monat. Die genaue Berechnungsformel für die astronomische mögliche Sonnenscheindauer ist in Appendix 1 beschrieben. Die dafür benötigten Koordinaten der geographischen Breite (in Dezimalgrad) der Temperaturmessstationen werden im GIS (ArcMap) ausgelesen.

Als zweite Variante wird versucht, die potentielle Verdunstung unter Berücksichtigung der reliefbedingten Verminderung der astronomisch möglichen Sonnenscheindauer durch die Abschattung zu ermitteln. Die Sonnenscheindauer kann durch die Exposition der Station und den Einfluss des umliegenden Reliefs stark von der astronomisch möglichen abweichen (siehe Tab.12). Die Verminderung der Sonnenscheindauer und somit der Energie, die der Verdunstung zur Verfügung steht, führt zu einer Reduzierung der monatlichen Verdunstungshöhe.

Die reliefbedingte Sonnenscheindauer jeder Station wird mit dem Open source GIS GRASS gewonnen. Das eigens erstellte Skript (siehe Appendix) baut auf dem Strahlungsmodell von Hofierka und Suri (2002a, 2002b) auf. Das Digitale Geländemodell SRTM78 (siehe NASA 2002) liefert die nötigen Geländeparameter für die Modellierung der Sonnenscheindauer.

Monat	Innsbruck (Universität) 577m		Langen am Arlberg 1218m		Schopernau 835m	
	aSSD	rSSD	aSSD	rSSD	aSSD	rSSD
1	8,63	6,8	8,72	0,5	8,7	1,2
2	9,96	9	10,02	4	10,01	6
3	11,54	10	11,56	8	11,55	8
4	13,36	13	13,32	11	13,33	11
5	14,88	13	14,8	12	14,82	12
6	15,72	14	15,62	12	15,64	13
7	15,42	14	15,32	12	15,34	13
8	14,12	13	14,06	12	14,08	12
9	12,38	12	12,37	10	12,37	10
10	10,62	10	10,66	7	10,65	7
11	9,06	7,25	9,15	1,75	9,13	3
12	8,27	6	8,38	0	8,36	0

Tabelle 12: Vergleich der Sonnenscheindauer (SSD) in Stunden als aSSD...mittlere tägliche astronomisch mögliche Sonnenscheindauer des jeweiligen Monats, rSSD...mittlere tägliche reliefbedingte Sonnenscheindauer des jeweiligen Monats. Berücksichtigt wird nur die direkte Sonneneinstrahlung bei klarem Himmel.

3.4 Ergebnisse

Die drei Beispielstationen (siehe Tab.14 und Abb.4) spiegeln die jahreszeitlichen Schwankungen der potentiellen Verdunstung des gesamten Tirol Atlas Gebietes recht gut wider. Das Maximum der Verdunstungshöhe wird im Monat Juli erreicht. Die geringste Verdunstungshöhe (Minimum) findet sich für Stationen, die stets eine positive Monatsmitteltemperatur aufweisen, im Monat Jänner. Da

beim Thornthwaiteansatz die Verdunstung bei einer negativen Monatsmitteltemperatur aussetzt, kann das Minimum für Stationen mit $T_{mon}=0$ ($? Ep,mon=0$) über mehrere Monate andauern.

Der Zeitpunkt des Jahresmaximums bzw. -minimums an potentieller Verdunstung wird durch den jahreszeitlichen Lufttemperaturverlauf bestimmt. Obwohl die mittlere tägliche astronomisch mögliche Sonnenscheindauer (aSSD) im Juni am längsten und im Dezember am kürzesten ist, wird in diesen Monaten kein Extremwert erreicht (ausser bei negativer Monatsmitteltemperatur $? Ep,mon=0$). Es ist zu erkennen, dass das Ergebnis der Modellierung sehr stark von der Monatsmitteltemperatur der Luft gesteuert wird. Die Lufttemperatur ist nichts anderes als ein Ausdruck der vorhandenen sensiblen Wärme (Energie). Dieses Wärmeangebot wiederum wird durch die geographische und die topographische Lage der Messstation variiert.

Thornthwaite hat den empirischen Zusammenhang zwischen Lufttemperatur und potentieller Verdunstung dazu verwendet, um aus den wenigen Eingangsdaten (Lufttemperatur, Sonnenscheindauer) einen vernünftigen Richtwert zu erhalten. Beim Vergleich (siehe Abb.4) des gewählten Ansatzes (Thornthwaite) mit den Ergebnissen der Penman-Modellierung des Umweltinstituts Vorarlberg zeigt sich, dass die Werte des Thornthwaite-Ansatzes geringer ausfallen. Ein Grund dafür kann die fehlende Beachtung der Sublimation im Thornthwaite-Ansatz sein. Auf die Vegetationsperiode (April bis Oktober) bezogen, weichen die Werte der beiden Modellierungsansätze nur sehr gering von einander ab.

Die Verminderung der potentiellen Verdunstung durch das Ersetzen der aSSD mit der reliefbedingten Sonnenscheindauer führt erwartungsgemäß zu geringeren Verdunstungswerten (siehe Tab.13). Es ist sicher sinnvoll, die unterschiedlichen Abschattungsbedingungen der Temperaturmessstationen zu berücksichtigen, aber dabei sollte einerseits nicht vergessen werden, dass die Lage der Stationen ein beeinflussender Faktor für die Lufttemperatur darstellt und somit schon in die Berechnungen miteinfließt und andererseits die Methode von Thornthwaite (1948) auf die aSSD abgestimmt sind.

Monat	Innsbruck (Universität) 577m		Langen am Arlberg 1218m		Schoppernaut 835m	
	Ep,mon	Ep,mon reliefbedingt	Ep,mon	Ep,mon reliefbedingt	Ep,mon	Ep,mon reliefbedingt
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	4,4	3,9	0,0	0,0	0,0	0,0
3	30,5	26,4	1,8	1,3	6,4	4,5
4	59,2	57,6	32,2	26,6	39,4	32,5
5	96,3	84,1	73,5	59,6	80,4	65,1
6	116,9	104,1	95,7	73,6	102,3	85,0
7	128,8	116,9	111,2	87,1	116,3	98,5
8	114,1	105,1	99,6	85,0	102,3	87,2
9	82,6	80,0	73,5	59,4	73,8	59,7
10	51,1	48,1	49,3	32,4	45,6	30,0
11	17,7	14,2	13,3	2,6	8,2	2,7
12	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Summe	701,6	640,4	550,1	427,6	574,7	465,2

Tabelle 13: Vergleich der zwei Berechnungsarten der potentiellen Verdunstungshöhe (Ep,mon) in mm.

Monat	Innsbruck (Universität) 577m		Langen am Arlberg 1218m		Schoppernau 835m	
	Thornthwaite	Penman	Thornthwaite	Penman	Thornthwaite	Penman
1	0,0	-	0,0	5,3	0,0	5
2	4,4	-	0,0	6,3	0,0	1,4
3	30,5	-	1,8	10,9	6,4	9,8
4	59,2	-	32,2	21,5	39,4	42,7
5	96,3	-	73,5	98,1	80,4	98,4
6	116,9	-	95,7	105,6	102,3	101,8
7	128,8	-	111,2	113,1	116,3	110,4
8	114,1	-	99,6	96,4	102,3	96
9	82,6	-	73,5	73,1	73,8	69
10	51,1	-	49,3	44,4	45,6	45,2
11	17,7	-	13,3	13,2	8,2	14
12	0,0	-	0,0	8,5	0,0	5,9
Summe	701,6	0	550,1	596,4	574,7	599,6

Tabelle 14: Vergleich der Penman-Kalkulation (Penman, 1948) mit den Ergebnissen des Thornthwaite Ansatzes. Die Daten der Penman-Kalkulation wurde von Werner (2001) zur Verfügung gestellt und stellen das 30-jährige Mittel (1961-1990) dar.

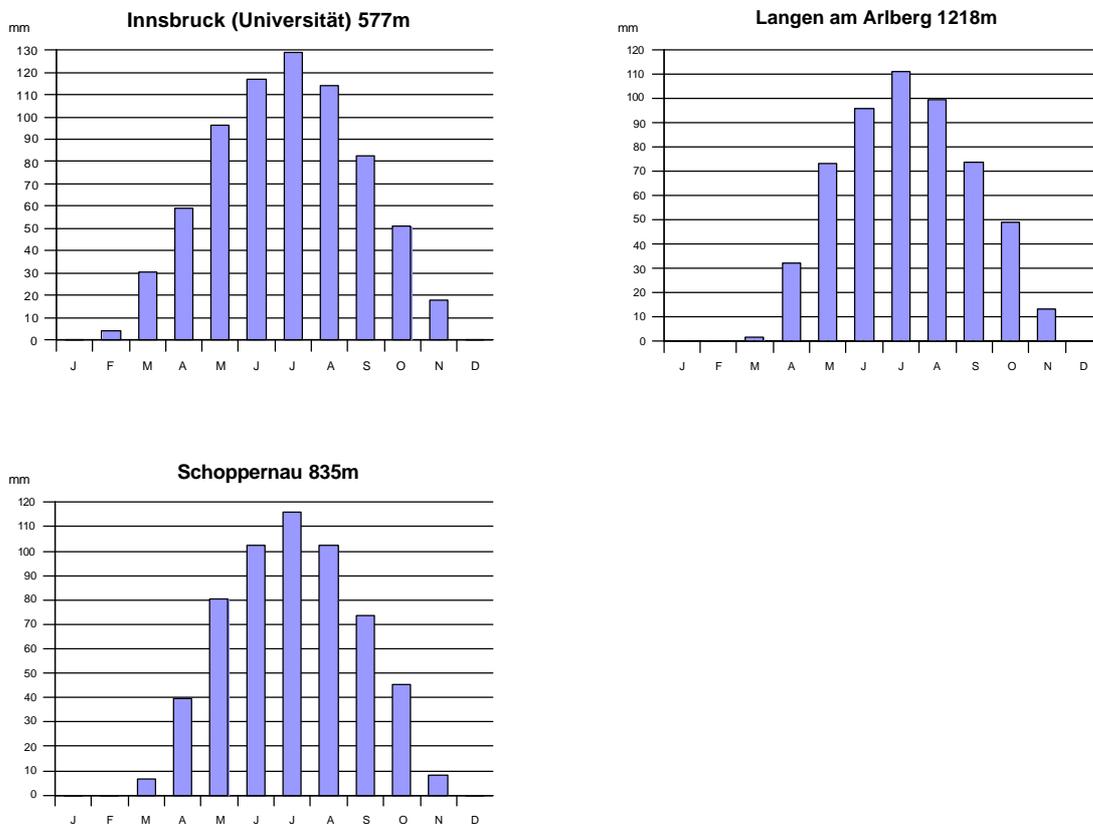


Abbildung 4: Mittlere Monatssummen der Verdunstung in mm berechnet nach dem Thornthwaite Ansatz.

4 Diskussion

Das Ziel des Projektmoduls ist die Erstellung einer Wasserbilanz für das Tirol Atlas Gebiet. Im Falle der Verdunstung wird dabei ein sehr einfacher Ansatz mit wenigen Eingangsgrößen angewandt. Ein wesentlicher Vorteil des verwendeten Verfahrens ist die Unabhängigkeit von den anderen Wasserhaushaltsgrößen. Im Gegensatz zu anderen Modellierungsansätzen, die mit mathematischen Interpolationsverfahren arbeiten, handelt sich beim Vegetationstypenansatz um eine qualitative Interpolation. Ebenso wie bei den anderen Verfahren liegen Punktinformationen vor, die jedoch nicht direkt interpoliert, sondern auf eine bestimmte Landnutzungsklasse übertragen werden. Dem liegt die Annahme zugrunde, dass durch die wechselseitige Beziehung zwischen dem Wasser- und Energiehaushalt und den Standortbedingungen der Vegetation Rückschlüsse von der Vegetation auf die Verdunstung möglich sind. Das bedeutet „gleiche Vegetationseinheit weisen gleiche Verdunstungsraten auf“. Es stellt sich die Frage, ob sich dieser empirische Ansatz gegenüber prozessorientierten Ansätzen rechtfertigen lässt.

Die Verdunstung ist ein komplexer Prozess, der sich aus vielen Teilprozessen (z.B. Transpiration, Interzeptionsverdunstung, Evaporation, Schneeverdunstung,...) zusammensetzt. Diese Teilprozesse unterliegen dem Wasser- und Energiehaushalt. Die Entwicklung und Umsetzung prozessorientierter Modelle mit viel Zeit- und Kostenaufwand verbunden. Selbst sehr umfangreiche und detaillierte Modelle, wie z.B. der Hydrologische Atlas der Schweiz (HADES) eines entwickelt hat, bleiben Modelle und können die Realität nicht vollständig abbilden. Wie bereits erwähnt, spiegelt u.a. die räumliche Differenzierung der Vegetation diese Komplexität wider. Der Vegetationstypenansatz nutzt diese Zusammenhänge und liefert trotz seines einfachen Aufbaus vergleichbar gute und nachvollziehbare Resultate.

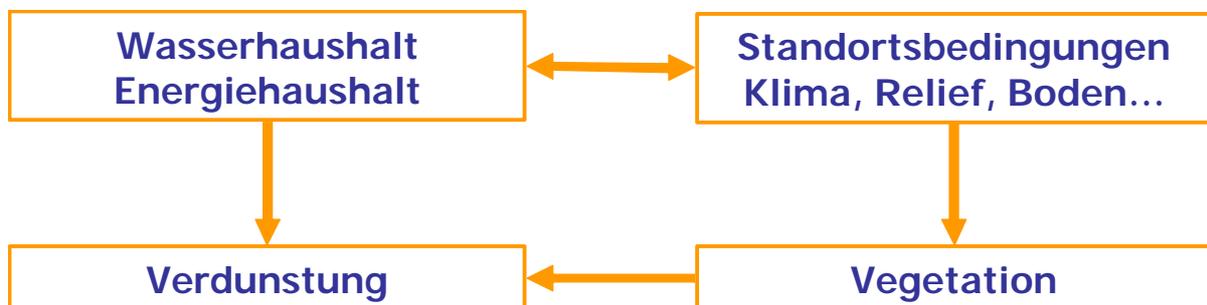


Abbildung 5: Wechselwirkung zwischen Vegetation, Standortbedingungen, Wasser- und Energiehaushalt und der Verdunstung.

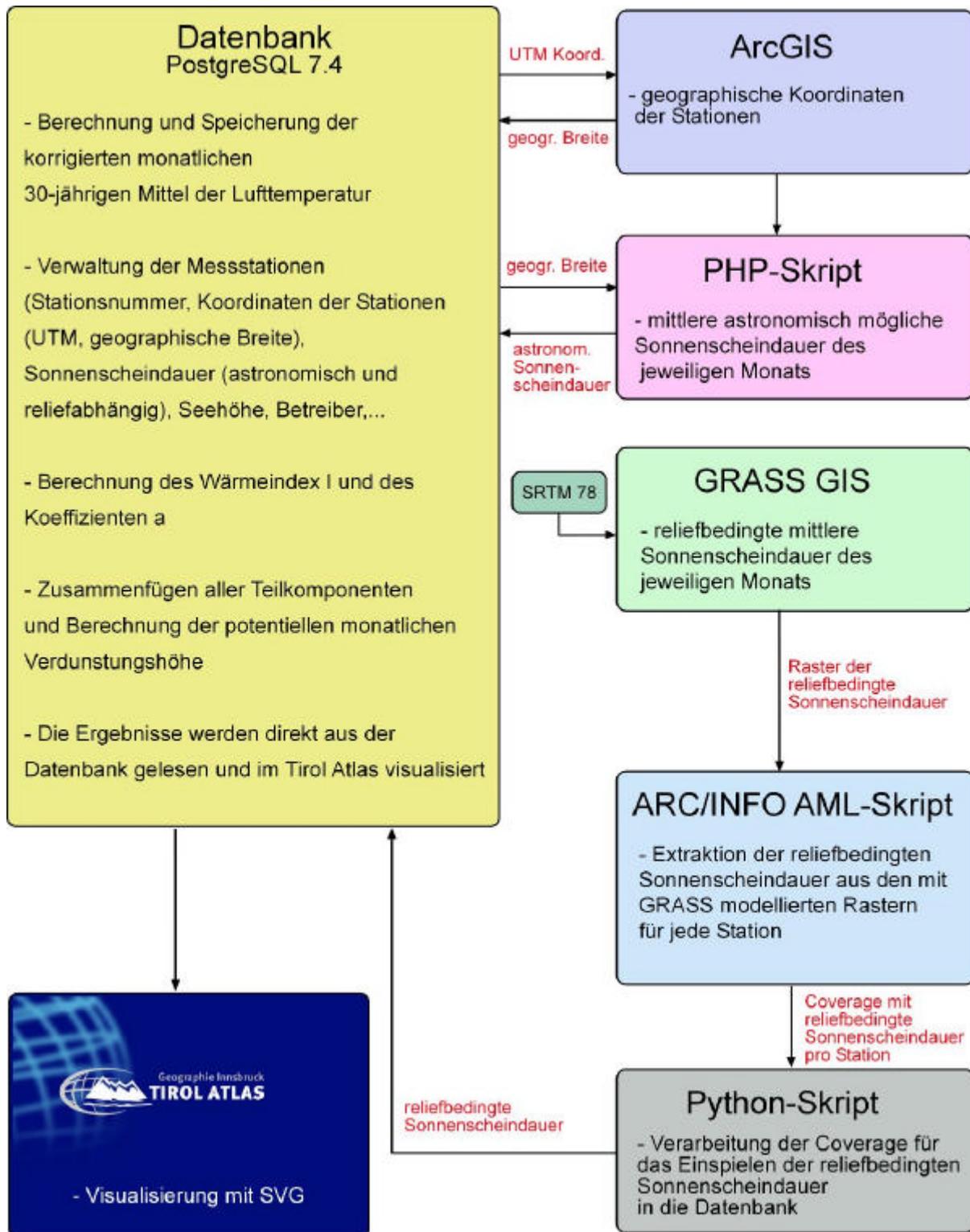
Bei der vorhandenen Auflösung (räumlich und zeitlich) der Eingangsdaten sollten die Gebietseinheiten die Größe des Einzugsgebiets Brixental (siehe Abb.3) nicht unterschreiten. Bei einer Verbesserung der Auflösung der Eingangsdaten ist es möglich die Gebietsverdunstung auch für kleinere Gebietseinheiten zu berechnen. Wünschenswert wären eine aktuellere, räumlich und zeitlich differenziertere Karte der Dauer der Schneebedeckung, eine besser auflösende Vegetationskartierung und zusätzliche Verdunstungsmesswerte.

5 Literatur

- Barry, R.B., 1992. Mountain Weather and Climate. 2. Auflage, London.
- Broucek, B., 1989. Abschätzung der Gebietsverdunstung in zwei alpinen Einzugsgebieten (Brixentaler Ache und obere Etsch – Vinschgau). Diplomarbeit Institut für Geographie, Universität Innsbruck, Innsbruck.
- Bundesamt für Statistik, 1998. Swiss Land Use in the European Context. Integration of Swiss Land Use Statistics with CORINE Land Cover. Neuchâtel.
- European Environment Agency, 1993. Corine Land Cover, Technical Guide. Luxembourg.
- Fliri, F., 1975a. Schneeverhältnisse – Die Dauer der Schneedecke. In: Beiträge und Begleittexte zum Tirol Atlas II, Innsbruck.
- Fliri, F., 1975b. Das Klima der Alpen im Raume von Tirol (Monographien zur Landeskunde Tirols I.). Innsbruck, München.
- Hofer, H., 1995. Wasserhaushalt unterschiedlich bewirtschafteter Graslandökosysteme im Gebirge. Diplomarbeit Institut für Botanik, Universität Innsbruck.
- Hofierka, J., Suri, M., 2002a. Description of r.sun. URL <http://grass.itc.it/>, 4.6.2004.
- Hofierka, J., Suri, M., 2002b. The solar radiation model for Open source GIS: implementation and applications. Manuscript submitted to the International GRASS users conference in Trento, Italy, September 2002.
- Kaser, G., 1985. Zur Abschätzung der Gebietsverdunstung im Ötztal. Unveröffentlichtes Manuskript, Institut für Meteorologie und Geophysik, Universität Innsbruck, Innsbruck.
- NASA, 2002. Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Spatial Metadata Dataset. Sioux Falls.
- Penman, H. L., 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proceedings of the Royal Society 193 (A), 125-145.
- Salchner, G., 1997. Vergleichende Analyse des Wasserhaushaltes einer Mähwiese, einer Weide und einer Brache im Bereich der Kaserstattalm /Stubaital (Tirol). Diplomarbeit Institut für Botanik, Universität Innsbruck.
- Sapinsky, S., 2001. Auswirkungen von Bewirtschaftungsänderungen auf die Bestandesstruktur, das Lichtklima und die Austauschprozesse (H₂O, CO₂) zwischen Bestand und Atmosphäre von Graslandökosystemen im Stubaital (Nordtirol, 1900 m NN) und Passeiertal (Südtirol, 1770 m NN). Diplomarbeit Institut für Botanik, Universität Innsbruck.
- Siogas, L., 1972. Vergleich von Temperaturmittelbildungen mit dem wahren Mittel für die Observation Innsbruck Universität. Wetter und Leben, Jg 24, 17-22.
- Stumreich, J., 1997. Vorherrschende Landnutzung. Blatt L1, Tirol Atlas, Innsbruck.
- Thornthwaite, C. W., 1948. An approach toward a rational classification of climate. Geographical Review 38 (1), 55-94.
- Umweltbundesamt, 2004. CORINE Landcover Österreich. URL <http://www.umweltbundesamt.at>, 5.6.2004.
- Werner, R. (Hg.), 2001. Klima von Vorarlberg. Umweltinstitut des Landes Vorarlberg. Amt der Vorarlberger Landesregierung. Bregenz.

Appendix

Appendix 1: Workflow



Appendix 2: SQL-Statement: monatlicher Wärmeindex Imon

```
SELECT mittel30_t.id, mittel30_t.monat, mittel30_t.mittel30, (
CASE
WHEN mittel30_t.mittel30 < 0::numeric THEN 0::numeric
ELSE mittel30_t.mittel30
END / 5::numeric(10,2))::double precision ^ (1514 / 1000)::double precision
AS imon
FROM wasser.mittel30_t;
```

Appendix 3: SQL-Statement: Wärmeindex für das Jahr (=Jahressumme Imon) und Koeffizient a

```
SELECT thornyimon.id, sum(thornyimon.imon) AS i, (0.0675::double precision *
(sum(thornyimon.imon) ^ 3::double precision) - 7.71::double precision *
(sum(thornyimon.imon) ^ 2::double precision) + 1792::double precision *
sum(thornyimon.imon) + 49239::double precision) * (10::double precision ^ -
5::double precision) AS a
FROM wasser.thornyimon
GROUP BY thornyimon.id;
```

Appendix 4: SQL-Statement: Berechnung von Ep,mon aus den Zwischenergebnissen (siehe oben)

```
SELECT id, breite, monat, mittel30, imon, i, a, sonne, grass, tage,
CASE
WHEN mittel30 > 0::numeric THEN (0.533 * tage::numeric * sonne /
12::numeric)::double precision * (((10::numeric * mittel30)::double precision / i)
^
a)
ELSE 0::double precision
END AS epot,
CASE
WHEN mittel30 > 0::numeric THEN (0.533 * tage::numeric * grass /
12::numeric)::double precision * (((10::numeric * mittel30)::double precision / i)
^
a)
ELSE 0::double precision
END AS epot_grass
FROM wasser.thornyimon
JOIN wasser.thornya USING (id)
JOIN wasser.thorny_stat USING (id, monat)
JOIN wasser.tagepromonat USING (monat);
```

Appendix 5: PHP-Skript für die Berechnung der durchschnittlichen Tageslänge pro Monat (in Stunden)

```
<?php
/*****
***
echo "Skript für die Berechnung der durchschnittlichen Tageslänge pro Monat (in
Stunden)\n";
echo "input: thorny.txt\n";
echo "StationsID, geographische Breite in Dezimalgrad (getrennt mit
Leerzeichen)\n";
echo "output: thorny_erg.txt\n";
echo "StationsID, Monat (1-12), durchschnittliche Tageslänge\n";
echo "Anmerkung: Relief wird nicht berücksichtigt\n";
echo "(c) M.F. & B.H. 2004\n";
echo "-----";
echo "\n";
echo "started ";
$ergebnis="Skript für die Berechnung der durchschnittlichen Tageslänge pro Monat
(in Stunden)\n input: thorny.txt\n StationsID, geographische Breite in
Dezimalgrad (getrennt mit Leerzeichen)\n output: thorny_erg.txt\n StationsID,
Monat (1-12), durchschnittliche Tageslänge\n Anmerkung: Relief wird nicht
berücksichtigt\n (c) M.F. & B.H. 2004\n";
```

```

*****\n\n";
//Öffne die Stationsdatei
$datei=fopen("thorny2.txt","r");
while(!feof($datei)){
    echo "*";
    $i=fgetc($datei);
    //Extrahiere die 9-stellige StationsID
    $id = substr($i,0,9);
    if($id){

        //Extrahiere die geographische Breite
        $breite = substr($i,10,15);
        //Vektor mit den Tagen des Beginns des neuen Monats
        $tag=array(1,32,60,91,121,152,182,213,244,274,305,335);
        $pos=0;
        $x=1;
        $y=1;
        $laenge=0;
        do
        {
            //Deklination
            $deklin = 23.45*sin(((360*(284+$y)/365.24))*(pi()/180));
            //Tageslänge
            $laenge=$laenge+(2*(4*(acos((-tan($deklin*pi()/180))*(tan($breite*pi()/180)))*180/pi())));
            $y=$y+9;
            //wenn alle 4 Werte des Monats berechnet wurden
            if($x==4)
            {
                //Mittelwertbildung für den Monat
                $laengegesamt=round($laenge/4/60,2);
                $monat=$pos+1;
                $ergebnis.= "$id\t$monat\t$laengegesamt\n";
                $laenge=0;
                $pos=$pos+1;
                $y=$tag[$pos];
                $x=0;
            }
            $x++;
        }
        while($pos<12);
    }
}
fclose($datei);
$datei=fopen("thorny_erg.txt","w");
//Ergebnisse in Datei ausgeben
fputs($datei,$ergebnis);
fclose($datei);
echo "finished";
?>

```

Appendix 6: Shell-Skript für die Berechnung der reliefabhängigen Sonnenscheindauer in GRASS

```

#!/bin/sh
# This program is Free Software under the GNU GPL (>=v2).
# Cited from the book:
#   Markus Neteler and Helena Mitasova:
#   Open Source GIS: A GRASS GIS Approach.
#   Kluwer Academic Publishers, Boston, Dordrecht, 464 pp,
#   ISBN: 1-4020-7088-8, http://mpa.itc.it/grasstutor/
#
# Modified by Michael Fecht, Department of Geography Innsbruck 2004
# Compute a sum of daily global radiation for a specified period of the year

#Input: elevationgrid, slopegrid and aspectgrid

echo "Enter elevation map:"

```

```

read elev
g.copy rast=$elev,SOLelev
echo "Enter slope map:"
read sl
g.copy rast=$sl,SOLslope
echo "Enter aspect map:"
read asp
g.copy rast=$asp,SOLaspect
echo "Enter Latitude of given region:"
read lat
echo "Enter first Month: [1]"
read i
echo "Enter last Month: [12]"
read lastmonth

#loop for each month
while [ $i -le $lastmonth ]
do
    echo "Monat $i"
    m=`echo $i`
    # generate empty maps for each months insolation_time
    r.mapcalc month.$m=0
    r.mapcalc month_mean.$m=0

#defines the first day of each month
    case $i in
        1) d=1;;
        2) d=32;;
        3) d=60;;
        4) d=91;;
        5) d=121;;
        6) d=152;;
        7) d=182;;
        8) d=213;;
        9) d=244;;
        10) d=274;;
        11) d=305;;
        12) d=335;;
    esac

    k=1
#Calculation (4 days per month always 1st, 9th, 18th, 27th)

    while [ $k -le 4 ]
    do
        echo "Durchlauf $k , tag $d"
        day=`echo $d`

        echo "es ist wirklich Tag $day"
#r.sun function (see GRASS manual), Calculates insolationtime for a day
        r.sun -s elevin=SOLElev aspin=SOLaspect slopein=SOLslope\
            lat="$lat" day="$d" step=1 dist=1\
            insol_time=time.$day

        echo "die datei time.$day wird verarbeitet und anschließend gelöscht"
#adds the value of the calculated day to the monthly grid, and removes the daily
grid
        r.mapcalc month.$m="month.$m + time.$day"
        g.remove rast=time.$day

        k=`expr $k + 1`
        d=`expr $d + 9`
    done
# calculating the monthly mean insolation time out of the 4 day per month
    r.mapcalc month_mean.$m="month.$m / 4"
    i=`expr $i + 1`
done

```

```

#cleanup:
g.remove rast=SOLElev,SOLaspect,SOLslope
echo "Finished."

Python-Skript für die Umwandlung einer Kreuztabelle in eine Liste mit SQL-
Statements:

#! /usr/bin/env python

print ""

```

Appendix 7: Skript fuer die Umwandlung einer Kreuztabelle in eine Liste (Bernhard Hoefle 2004)

```

+++++
Interaktive Eingabe des Input-Files
Output: output.txt
sucht nach Tabulatoren, 13 Werte, erster Wert wird als ID hergenommen
die Ausgabe erfolgt als SQL UPDATE Statement für die Stationstabelle
+++++

"""
#Funktion für das Einlesen des Input-Dateinamens
def readfile():
    print "Input file name: ",
    file_in = raw_input()
    return file_in

#Aufruf der Funktion
file_in=readfile()

#Das Output-File wird erstellt/überschrieben
out_file = file("output.txt","w")

#das Input-File wird geöffnet
the_file = open(file_in,'r')

#Jede Zeile des Files wird in einer Schleife bearbeitet
for line in the_file.readlines():
    zeile = line.split("\t")
    id = str(zeile[0])

    #Schleife für alle Einträge in einer Zeile
    for x in range(1,13):
        monat=str(x)
        wert=str(zeile[x])

        #das Return am Ende der Zeile soll ersetzt werden
        wert = wert.replace("\n","")
        outstr = "update wasser.thorny_stat set grass="+wert+" where
id="+id+" and monat="+monat+";\n"
        out_file.write(outstr)

the_file.close()
out_file.close()

```

Appendix 8: AML-Skripts für das Auslesen der Raster-Werte für eine Punkt-Coverage:

```

/* start.aml
/* ruft gridspot.aml für jeden Monat (bzw. Raster) auf
    &r gridspot.aml 1
    &r gridspot.aml 2
    &r gridspot.aml 3

```

```

&r gridspot.aml 4
&r gridspot.aml 5
&r gridspot.aml 6
&r gridspot.aml 7
&r gridspot.aml 8
&r gridspot.aml 9
&r gridspot.aml 10
&r gridspot.aml 11
&r gridspot.aml 12

/* gridspot.aml
&severity &error &routine bailout

&args i

/* -----Argument checking-----

    &sv grid_name m%i%
    &sv ptcov stationen
    &sv spot_item spot%i%

/* Check whether item already exists in PAT

&if [iteminfo %ptcov%.pat -info %spot_item% -exists] &then
&do
    &type Existing item %spot_item% in %ptcov%.PAT will be overwritten.
    &if [translate [getchar 'Type q if you want to quit now' n]] = 'Q' &then
        &call exit;&return
&end

/* Add item %spot_item% (if necessary) to point coverage PAT.
&else
    additem %ptcov%.pat %ptcov%.pat %spot_item% 4 12 f 3

/* Now go into Arcplot and get the values

&sv old$display [show display]
display 9999 size canvas 10 10      /* A graphic display is needed
ap
mape %grid_name%

/* Declare and open a cursor to read and write to the PAT

cursor ptcurl declare %ptcov% points rw
cursor ptcurl open

/* Do not alter the lines below. This AML depends on capturing screen
/* messages to a watch file.

&s old$echo [show &echo]
&echo &off
&s old$messages [show &messages]
&messages &on

/* Start a loop to go through the PAT, find the cell value at each
/* point location, and write it to the %spot_item% item in the PAT.

&do &while %:ptcurl.aml$next%

    &s old$echo [show &echo]
    &echo &off
    &s old$messages [show &messages]
    &messages &on

    /* Start the watch file, get a point, and get the value w/ cellvalue.

    &watch xtemp
    cellvalue %grid_name% [show select %ptcov% point 1 xy]
    &watch &off

```

```

&echo %old$echo%

/* Open the watch file and read from it

&s file$unit1 [open xtemp openstat$unit1 -r]
&s record [read %file$unit1% readstat$unit1]

/* Extract the last element, it's the cell value
/* and set %spot_item% to that value
/* If the location has NODATA, set %spot_item% to -9999

&if [keyword NODATA [unquote %record%]] = 0 &then /* The cell is not NODATA
  &s :ptcur.%spot_item% [extract 9 [unquote %record%]]
&else
  &s :ptcur.%spot_item% -9999 /* The cell has NODATA

&s close$stat [close %file$unit1%]
cursor ptcur next
&end

q /* quit from arcplot
&call exit
&return /* To calling aml
/*
/* ----- Routine Exit -----
/*
&routine exit
&if [variable old$display] &then
  display %old$display%
&if [variable old$messages] &then
  &messages %old$messages%
&if [variable old$echo] &then
  &echo %old$echo%
&s close$stat [close -all]
&sv d [delete xtemp -file]
&return
/*
/* ----- Routine Bailout -----
/*
&routine bailout
&severity &error &ignore
&call exit
&return; &return &error Bailing out of gridspot.aml

```

Appendix 9: Tabelle der 3 Beispielstationen (Temperaturmessstationen)

Stationsnummer	Bezeichnung	Einzugsgebiet	UTM-Rechtswert	UTM-Hochwert	Geogr. Breite	Seehöhe [m]	Betreiber
170102335	Innsbruck (Universität)	Inn	681546	237629	47,27	577	Hydrographischer Dienst Tiroll
180100255	Langen am Arlberg	Alfenz	585349	220494	47,13	1218	ZAMG
180100552	Schoppernau	Bregenzer-ach	576723	240059	47,3	835	ZAMG