

# Sensitivität von Prozessmodellen in Bezug auf die Auflösung LIDAR-basierter Höhendaten

Diplomarbeit

am Geographischen Institut der  
Mathematisch-naturwissenschaftlichen Fakultät  
der Universität Zürich

Ralph Straumann

Betreuer:

Dr. Ross Purves

Fakultätsvertreter:

Prof. Dr. Robert Weibel

Zürich, 21.12.2005



---

## **Kontaktinformationen**

Ralph Straumann

Kirchstrasse 3B

CH-8953 Dietikon

+41 44 321 99 55

rstrauma@geo.unizh.ch

<http://www.ralphstraumann.ch>





---

## Danksagung

Ich möchte folgenden Personen meinen Dank aussprechen:

- Prof. Dr. Robert Weibel vom Geographischen Institut der Universität Zürich für die Unterstützung und Gespräche vor und während meiner Diplomarbeit
- Robert Fowler von Lasermap Image Plus/GPR für die Zahlen zur globalen Verbreitung von LIDAR-Sensoren
- Franz Bill und dem Amt für Geoinformation des Kantons Bern für die unkomplizierte und prompte Bereitstellung von LIDAR-Daten aus dem Projekt LWN (Landwirtschaftliche Nutzflächen der Schweiz)
- Roberto Artuso, dem Technischen Leiter des Projekts LWN des Bundesamtes für Landestopografie (Swisstopo), für die Metadaten zu den in dieser Arbeit verwendeten LIDAR-Daten im Gebiet Boltigen
- Dr. Erich Meier und Lukas Wotruba von den Remote Sensing Laboratories des Geographischen Instituts der Universität Zürich für ihre Anregungen zur Interpolationsmethode der LIDAR-Daten
- Prof. Dr. Keith J. Beven von der Hydrology and Fluid Dynamics Group der Universität Lancaster für die Beratung bei der Implementation und Analyse von TOPMODEL
- Felix Hebler vom Geographischen Institut der Universität Zürich für die Bereitstellung von SRTM-Daten sowie seine Hilfe im Rahmen der Korrektur dieser Arbeit und der Vorbereitung auf mein Diplomkolloquium
- Den Diplomanden David Guntli, Bruno Seiler, Susette Burger und Christian Sailer für interessante und motivierende Gespräche und im Fall von Susette für die Zusammenarbeit in Übungen, die parallel zu meiner Diplomarbeit liefen
- Dr. Ross Purves, meinem Diplomarbeitsbetreuer, für seine Hilfsbereitschaft, seine Kritik und wertvolle Gespräche, die mich und meine Diplomarbeit weitergebracht haben
- Claudia Bühlmann für die liebevolle Unterstützung
- Meinen Eltern, Kurt und Susanne Straumann, die mir das alles erst ermöglicht haben

Vielen Dank!



---

*«Models are undeniably beautiful, and a man [or a woman] may justly be proud to be seen in their company. But they may have their hidden vices.*

*The question is, after all, not only whether they are good to look at, but whether we can live happily with them.»*

*A. Kaplan, 1964, zit. in Beven 2001*



---

## Inhalt

<b>1. Einleitung</b> .....	1
1.1 Sensor- und Dateninnovation .....	1
1.2 Zielsetzung .....	1
1.3 Fragestellung .....	2
1.4 Methodik .....	2
1.5 Aufbau der Arbeit.....	3
<b>2. LIDAR</b> .....	4
2.1 Technologische Entwicklung .....	4
2.2 Verbreitung und Rezeption .....	4
2.3 LIDAR-Daten in der Schweiz .....	5
2.3.1 Das Projekt «Landwirtschaftliche Nutzflächen».....	5
2.3.2 Daten im Untersuchungsgebiet .....	6
<b>3. Digitale Geländemodellierung</b> .....	10
<b>4. Fokal aggrierendes Modell: Daisyworld</b> .....	13
4.1 Zelluläutomaten.....	13
4.2 Daisyworld als Zelluläutomat .....	15
4.3 Modellierung der Umweltbedingungen.....	17
4.3.1 Energiebilanz.....	17
4.3.2 Kurzwellige Einstrahlung.....	17
4.3.3 Langwellige Abstrahlung .....	18
4.3.4 Wärmediffusion.....	18
4.4 Erweiterungen von Daisyworld.....	19
4.5 Lokale Eigenschaften und fokale Einflüsse .....	20
4.6 Verwendete Geländemodelle .....	21
4.7 Ablauf der Modellierungen .....	25
<b>5. Resultate und Diskussion Daisyworld</b> .....	27
5.1 Ähnlichkeit der Zählraster.....	29
5.2 Autokorrelation der Zählraster .....	30
5.3 Statistische Betrachtung von Modellierungsgrössen.....	32
5.3.1 Anteile der Landnutzungen .....	32
5.3.2 Hangneigung und potentielle kurzwellige Einstrahlung .....	39
5.3.3 Temperatur .....	45
5.4 Räumliche Betrachtung der Modellierungsergebnisse .....	51
5.5 Quellen von Modellierungsunterschieden.....	62
5.5.1 Geländeeinflüsse .....	62
5.5.2 Granularität.....	64
5.5.3 Ränder des Untersuchungsgebiets.....	66
5.5.4 Definition des Zelluläutomaten und der Diffusion .....	67
<b>6. Zusammenfassung Daisyworld</b> .....	69

---

<b>7. Global aggregierendes Modell: TOPMODEL</b> .....	71
7.1 Konzept der Variablen Beitragenden Fläche .....	72
7.2 Modellbestandteile.....	73
7.2.1 Modellierung der Variablen Beitragenden Fläche .....	74
7.2.2 Modellierung der gesättigten Zone .....	76
7.2.3 Modellierung der Wurzelzone und der ungesättigten Zone.....	77
7.3 Forschungsstand.....	77
7.3.1 Sensitivität des Topographischen Index .....	77
7.3.2 Sensitivität der Modellierung.....	78
7.3.3 Sensitivität von kalibrierten Modellparametern.....	79
7.3.4 Hochauflösende Daten und TOPMODEL .....	82
7.3.5 Zusammenfassung.....	83
7.4 Verwendete Geländemodelle .....	84
7.5 Der Topographische Index.....	85
7.6 Datensätze Niederschlag und Evapotranspiration .....	87
7.7 Ablauf der Modellierungen.....	88
<b>8. Resultate und Diskussion TOPMODEL</b> .....	90
8.1 Statistische Verteilung der Hangneigung.....	90
8.2 Statistische Verteilung des Topographischen Index .....	92
8.3 Räumliche Verteilung des Topographischen Index .....	96
8.4 Modellierte Abflussganglinien.....	100
8.5 Kompensation von Modellierungsunterschieden.....	102
8.6 Andere Modellgrößen .....	106
8.6.1 Abflusszusammensetzung.....	106
8.6.2 Maximale Beitragende Fläche .....	107
<b>9. Zusammenfassung TOPMODEL</b> .....	109
<b>10. Fazit</b> .....	111
10.1 Erreichtes .....	111
10.2 Erkenntnisse.....	113
10.3 Ausblick .....	115
<b>Literatur</b> .....	119
<b>Anhang</b> .....	123

---

## Abbildungen

Abb. 1: Kommerzielle Rezeption der LIDAR-Technologie .....	5
Abb. 2: Produktionsstand des DTM-AV .....	6
Abb. 3: Lage des Untersuchungsgebiets .....	7
Abb. 4: Einzugsgebiet des Wüstenbachs .....	8
Abb. 5: Der Schafarnisch .....	8
Abb. 6: Felswand im Tal des Wüstenbachs .....	9
Abb. 7: Von-Neumann-Nachbarschaft .....	15
Abb. 8: Verteilung der Wuchswahrscheinlichkeit $W$ der Daisies über der Temperatur .....	16
Abb. 9: Anfangszustand von Daisyworld .....	19
Abb. 10: Lage von Daisyworld am Schafarnisch .....	21
Abb. 11a: Daisyworld-DTM mit 1 Meter Auflösung .....	23
Abb. 11b: Daisyworld-DTM mit 2.5 Metern Auflösung .....	23
Abb. 11c: Daisyworld-DTM mit 5 Metern Auflösung .....	24
Abb. 11d: Daisyworld-DTM mit 10 Metern Auflösung .....	24
Abb. 11e: Daisyworld-DTM mit 20 Metern Auflösung .....	25
Abb. 12: Generierung eines Dominanzrasters aus drei Zählrastern der Auflösung 2.5 Meter .....	28
Abb. 13: Hangneigung in Daisyworld in der Auflösung 2.5 Meter .....	28
Abb. 14: Beispiele zur räumlichen Autokorrelation von Rastern .....	30
Abb. 15: Verlauf der Anteile der Landnutzungen der Auflösung 20 Meter für 5 Läufe à 10'000 Iterationen ...	33
Abb. 16: Verlauf der Anteile der Landnutzungen der Auflösung 10 Meter für 5 Läufe à 10'000 Iterationen ...	34
Abb. 17: Verlauf der Anteile der Landnutzungen der Auflösung 5 Meter für 5 Läufe à 10'000 Iterationen ....	35
Abb. 18: Verlauf der Anteile der Landnutzungen der Auflösung 2.5 Meter für 5 Läufe à 10'000 Iterationen ....	36
Abb. 19: Verlauf der Anteile der Landnutzungen der Auflösung 1 Meter für 5 Läufe à 10'000 Iterationen ....	36
Abb. 20: Mittelwerte und Standardabweichung der Anteile von Daisies und unbewachsenen Zellen .....	38
Abb. 21: Verlauf der Hangneigung pro Landnutzung der Auflösung 20 Meter für 5 Läufe à 10'000 Iterationen....	40
Abb. 22: Verlauf der Hangneigung pro Landnutzung der Auflösung 5 Meter für 5 Läufe à 10'000 Iterationen...41	
Abb. 23: Verlauf der potentiellen kurzwelligen Einstrahlung pro Landnutzung der Auflösung 5 Meter für 5 Läufe à 10'000 Iterationen .....	41
Abb. 24: Mittelwerte und dreifache Standardabweichung der Hangneigung .....	43
Abb. 25: Mittelwerte und dreifache Standardabweichung der potentielle kurzwellige Einstrahlung .....	44
Abb. 26: Einstrahlungs- und Hangneigungsdifferenz schwarzer und weisser Daisies .....	45
Abb. 27: Verlauf der Temperatur pro Landnutzung der Auflösung 20 Meter für 5 Läufe à 10'000 Iterationen....	46
Abb. 28: Verlauf der Temperatur pro Landnutzung der Auflösung 10 Meter für 5 Läufe à 10'000 Iterationen...47	
Abb. 29: Verlauf der Temperatur pro Landnutzung der Auflösung 5 Meter für 5 Läufe à 10'000 Iterationen.....47	
Abb. 30: Verlauf der Temperatur pro Landnutzung der Auflösung 2.5 Meter für 5 Läufe à 10'000 Iterationen...48	
Abb. 31: Verlauf der Temperatur pro Landnutzung der Auflösung 1 Meter für 5 Läufe à 10'000 Iterationen.....49	
Abb. 32: Mittelwerte und dreifache Standardabweichung der Temperatur .....	50
Abb. 33: Differenz der Temperatur schwarzer und weisser Daisies .....	51
Abb. 34: Dominanzraster und Hangneigung der Auflösung 1 Meter .....	52
Abb. 35: Dominanzraster und Hangneigung der Auflösung 2.5 Meter .....	53
Abb. 36: Dominanzraster und Hangneigung der Auflösung 5 Meter .....	54
Abb. 37: Dominanzraster und Hangneigung der Auflösung 10 Meter .....	56
Abb. 38: Dominanzraster und Hangneigung der Auflösung 20 Meter .....	57
Abb. 39: Querschnitraster und Hangneigung der Auflösung 1 Meter .....	58
Abb. 40: Querschnitraster und Hangneigung der Auflösung 2.5 Meter .....	60
Abb. 41: Querschnitraster und Hangneigung der Auflösung 5 Meter .....	60

---

Abb. 42: Querschnittstraster und Hangneigung der Auflösung 10 Meter .....	60
Abb. 43: Querschnittstraster und Hangneigung der Auflösung 20 Meter .....	61
Abb. 44: Box-Whisker-Plot der Hangneigung .....	62
Abb. 45: Verteilung der Hangneigung.....	63
Abb. 46: Kumulative Verteilung der Hangneigung .....	63
Abb. 47: Bodenstruktur in TOPMODEL.....	73
Abb. 48: Geschätzte und kalibrierte Werte für $K_0$ .....	82
Abb. 49: Verwendete Auflösungen in TOPMODEL-Untersuchungen .....	84
Abb. 50a: Flussakkumulation basierend auf Fliessrichtungen gemäss D8 .....	86
Abb. 50b: Flussakkumulation basierend auf Fliessrichtungen gemäss Quinn et al. (1995) .....	86
Abb. 51a: Single steepest descent-Algorithmus (D8 in ESRIs ArcGIS) .....	87
Abb. 51b: Multiple flow direction-Algorithmus von Quinn et al. (1995) .....	87
Abb. 52: Box-Whisker-Plot der Hangneigung.....	91
Abb. 53: Verteilung der Hangneigung.....	91
Abb. 54: Kumulative Verteilung der Hangneigung .....	92
Abb. 55: Box-Whisker-Plot des Topographischen Index .....	93
Abb. 56: Diskretisierte Verteilung des Topographischen Index .....	94
Abb. 57: Schwellenwerte der Hangneigung für negative Werte des Topographischen Index.....	95
Abb. 58a: Topographischer Index der Auflösung 2.5 Meter .....	96
Abb. 58b: Topographischer Index der Auflösung 5 Meter .....	97
Abb. 58c: Topographischer Index der Auflösung 10 Meter .....	97
Abb. 58d: Topographischer Index der Auflösung 20 Meter .....	98
Abb. 58e: Topographischer Index der Auflösung 40 Meter .....	98
Abb. 58f: Topographischer Index der Auflösung 80 Meter.....	99
Abb. 58g: Topographischer Index der Auflösung 160 Meter .....	99
Abb. 59: Abflussganglinien über 90 Stunden .....	100
Abb. 60: $K_0$ -Werte nach der Korrektur gemäss Franchini et al. (1996).....	103
Abb. 61: Abflussganglinien über 90 Stunden, mit Korrektur .....	104
Abb. 62a: Nash-Sutcliffe Efficiency der modellierten Ganglinien .....	105
Abb. 62b: Nash-Sutcliffe-Efficiency unter Ausblendung der negativen Efficiency-Werte.....	105
Abb. 63: Verteilung des Topographischen Index im Intervall [8, 18] .....	106
Abb. 64a: Zusammensetzung des modellierten Abflusses.....	107
Abb. 64b: Zusammensetzung des modellierten Abflusses, mit Korrektur .....	107
Abb. 65: Maximale Beitragende Fläche .....	107



---

## Tabellen

Tab. 1: Parameter der IDW-Interpolation für Daisyworld .....	22
Tab. 2: Gemittelte Korrelationswerte für jeweils 5 Zählraster pro Landnutzung und Auflösung.....	29
Tab. 3: Werte von Moran's I für die einzelnen Zählraster .....	31
Tab. 4: Gemittelter Anteil von Daisies und unbewachsenen Rasterzellen.....	37
Tab. 5: Durchschnittliche Hangneigung und potentielle kurzweilige Einstrahlung pro Landnutzung und in Daisyworld .....	42
Tab. 6: Temperatur pro Landnutzung und in Daisyworld.....	50
Tab. 7: Gewicht einer Rasterzelle in der Modellierung .....	65
Tab. 8: Gewicht der Randrasterzellen in der Modellierung .....	66
Tab. 9: Rang-Korrelationskoeffizienten von Modellierungsvariablen mit Parametern der TI-Verteilung .....	79
Tab. 10: Kalibrierte $K_0$ -Werte für verschiedene Auflösungen.....	80
Tab. 11: Parameter der IDW-Interpolation für TOPMODEL.....	85

# 1. Einleitung

## 1.1. Sensor- und Dateninnovation

Die Felder der Geographischen Informationswissenschaft und der Fernerkundung befinden sich in stetem technologischem Wandel. Dieser Wandel ermöglicht immer wieder bisher unrealisierte Anwendungen. Er birgt aber auch einige Risiken: Wie funktionieren bestehende Modelle mit den neuen Daten? Verletzen neuartige Daten Annahmen, die in den Modellen getroffen werden? Zahlt sich der für neuartige Daten oft höhere Prozessierungsaufwand in den Modellierungsergebnissen aus? Was genau (welche Massstabsebene eines Prozesses) kann mit den neuen Daten modelliert werden? Modellieren wir das, was wir modellieren wollen?

Für die Modellierung von Prozessen in der künstlichen und natürlichen Umwelt ist die Geographische Informationswissenschaft auf digitale Daten angewiesen. Neue Technologien der Gewinnung insbesondere von Höhendaten haben in den letzten Jahren dazu geführt, dass Daten in immer feineren Auflösungen verfügbar werden. Verbesserte Möglichkeiten zur Datenhaltung und -verarbeitung sind eine logische und notwendige Folge davon und katalysieren selbst wieder die technologische Innovation auf der Seite der Datenproduktion. Die neuen Daten höherer Auflösung werden breit verwendet – zumindest wo die Möglichkeit zur Nutzung der neuen Technologien besteht. Eine Technologie, die (Höhen-)Daten in bisher unrealistischer Auflösung produziert, ist *Light Detection and Ranging* (LIDAR, vgl. Abschnitt 2). „In recent years, high resolution LIDAR ... data are becoming increasingly popular and available“ (Kienzle 2004: 84). Es besteht jedoch eine gewisse Gefahr, dass diese neuen Daten höherer Auflösung unreflektiert oder zuwenig bedacht als Modellinput verwendet werden (Brasington und Richards 1997: 300).

Das Thema verschiedener (insbesondere verfeinerter) Auflösungen von Höhendaten ist aus obengenannten Gründen in der Geographischen Informationswissenschaft von Bedeutung und wird von diversen Autorinnen und Autoren untersucht. Die vorliegende Arbeit leistet einen Beitrag, die Auswirkungen der Verwendung neuartiger, hochaufgelöster Höhendaten auf Prozessmodelle zu verstehen.

## 1.2. Zielsetzung

In dieser Arbeit werden Fragen in bezug auf die Auswirkungen der Auflösung von Höhendaten behandelt. In Abweichung von vielen Autorinnen und Autoren sollen nicht (nur) die Auswirkungen unterschiedlicher Auflösungen von DHM auf Geländederivate (zum Beispiel Hangneigung,

Exposition, Plan- und Profilkurvatur) untersucht werden, sondern die Effekte, welche die Verwendung unterschiedlich aufgelöster Höhendaten im Zusammenhang mit Prozessmodellen nach sich ziehen. Diese Arbeit geht also einen Schritt weiter als die (wissenschaftlich ebenfalls legitime und notwendige) Untersuchung von Terrainderivaten. Unterschiedlich aufgelöste Höhendaten und deren Derivate werden als Eingangsgrößen in zwei Prozessmodelle verwendet. Von Interesse sind dann die Resultate, welche die Prozessmodelle mit unterschiedlich aufgelösten Daten liefern, und wie sich allfällige Unterschiede in diesen Resultaten erklären lassen.

### 1.3. Fragestellung

In der vorliegenden Arbeit werden folgende Forschungsfragen untersucht:

- Gibt es abhängig von der Auflösung der verwendeten Eingangs-Höhendaten Unterschiede in den Resultaten eines fokal aggregierenden Modells?
- Gibt es abhängig von der Auflösung der verwendeten Eingangs-Höhendaten Unterschiede in den Resultaten eines global aggregierenden Modells?

Wenn es Modellierungsunterschiede gibt:

- Wie lassen sich die Unterschiede charakterisieren?
- Lassen sich die räumlichen Gebiete, in denen die Unterschiede besonders stark sind, bzw. die Gebiete, die besonders stark zu den Unterschieden im (globalen) Resultat beitragen, charakterisieren?
- Welche möglichen Ursachen für Modellierungsunterschiede können ausgemacht werden?

### 1.4. Methodik

Zur Untersuchung der Auswirkungen von unterschiedlichen Auflösungen von Höhendaten werden diese in zwei Prozessmodelle eingespielen. Beide Modelle sollen prototypisch für Modellgruppen stehen. Das eine Modell vereint in sich stochastische Aspekte, das andere ist streng deterministisch. Beim einen Modell handelt es sich um ein sogenanntes „*toy model*“, an dem konzeptionelle Überlegungen überprüft werden können, beim anderen um eines, das global schon in zahlreichen Anwendungen eingesetzt wurde und wird. Das erste verwendet die gebräuchlichen Geländederivate Hangneigung und Exposition, das zweite ein komplexeres zusammengesetztes Derivat. Es wurden auch bewusst zwei Modelle unterschiedlicher Aggregierungsniveaus ausge-

sucht. Beim einen handelt es sich um ein fokal aggregierendes Modell, beim anderen um ein global aggregierendes Modell.

Unter einem fokal aggregierenden Modell versteht man ein Modell, bei dem die Modellierung für einen Punkt nur von den Werten topographischer Attribute an diesem Punkt und einer gewissen Umgebung abhängt. Unter einem global aggregierenden Modell versteht man ein Modell, bei dem die Modellierung von topographischen Eigenschaften potentiell aller betrachteten Punkte (Rasterzellen) im Untersuchungsgebiet abhängt.

Als fokal aggregierendes Modell wurde eine zweidimensionale Variante von Daisyworld, als global aggregierendes Modell TOPMODEL ausgewählt. Für beide Modelle wird zuerst ein Untersuchungsgebiet bestimmt, für welches dann ein Set von Höhendatensätzen verschiedener Auflösung erstellt wird. Anschliessend wird mit den verschiedenen Datensätzen modelliert. Die Modellierungsergebnisse werden dann vor dem Hintergrund der Forschungsfragen auf Unterschiede und Gemeinsamkeiten hin untersucht. Schliesslich sollen für jedes Modell mögliche Quellen für Modellierungsunterschiede ausgemacht werden.

## 1.5. Aufbau der Arbeit

In einem ersten Abschnitt wird genauer auf die LIDAR-Technologie eingegangen, wie sie zur Gewinnung von Höhendaten verwendet wird. Es wird dargelegt, wie sich die Technologie ausgebreitet hat und wie verbreitet sie heute angewendet wird. Es folgt ein Abschnitt, in dem eine mögliche Aufteilung der digitalen Geländemodellierung in fünf Felder eingeführt und erläutert sowie ausgewählte Beispiele aus der Forschung geschildert werden. Die vorliegende Arbeit wird damit in ihren grösseren Forschungskontext eingebettet. In der Folge wird im Hauptteil zuerst auf die Untersuchung anhand von Daisyworld, danach auf jene anhand von TOPMODEL eingegangen. Falls untersuchungsrelevante Forschung vorliegt, wird der Forschungsstand im Kontext der Modelle geschildert. Für jedes Modell werden jeweils die Implementation und Modellierungsmethodik, das Untersuchungsgebiet und die verwendeten Daten aufgezeigt. Es folgen die Analyse allfälliger auflösungsinduzierter Modellierungsunterschiede und der Versuch einer Herkunfthanalyse. Die Arbeit schliesst ab mit einem Fazit, das einen Ausblick für weitere Forschung enthält.

## 2. LIDAR

In diesem Abschnitt wird auf die Entwicklung der LIDAR-Technologie und deren mittlerweile globale Verbreitung eingegangen. LIDAR steht als Abkürzung für «*Light Detection And Ranging*», also Entfernungsmessung mittels Licht. Tatsächlich benutzt die LIDAR-Technologie Laser («*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*»), um Entfernungen zu messen. Beim sogenannten topographischen LIDAR (auch *LIDAR altimetry* oder ALS / *Airborne Laser-Scanning*) wird die Entfernung zwischen einer Plattform – zum Beispiel einem Flugzeug – und der Erdoberfläche oder Objekten darauf gemessen. Bei Kenntnis der Plattformposition kann aus diesen gemessenen Entfernungen ein Datensatz der Höhen der Erdoberfläche abgeleitet werden.

### 2.1. Technologische Entwicklung

Die LIDAR-Technologie umfasst verschiedene Hilfstechnologien, insbesondere die Laser-Technologie sowie (Differenzielles) GPS und Trägheitsmesssysteme. Die Laser-Technologie wurde bereits 1958 durch Arthur Schawlow und Charles Townes entwickelt. Schon seit den 1960er Jahren wurden Laser zur Entfernungsmessung zum Beispiel von der Erde zum Mond oder von der Erde zu Satelliten verwendet. Die Benutzung von Lasern in Flugzeugen wurde lange Zeit durch das prinzipielle Problem einer sich bewegenden Plattform verhindert. Die Position der beweglichen Plattform und die exakte Orientierung des Laser-Strahls müssen zum Zeitpunkt jeder Messung bekannt sein. Ansonsten ist es unmöglich festzustellen, zu welchem Punkt am Boden die Entfernung gemessen worden ist. Diese technologischen Unzulänglichkeiten wurden erst mit der Etablierung von (D)GPS und Trägheitsmesssystemen behoben. Diese Hilfstechnologien erreichten erst in den 1990er Jahren die nötige Genauigkeit, um mobile LIDAR-Plattformen in einem externen Referenzsystem exakt zu verorten und somit präzise flugzeuggetragene LIDAR-Messungen zu ermöglichen. In der Folge wurden Laser-Scanner-Systeme entwickelt, die die Topographie flächenhaft aus der Luft erfassen konnten (Fowler 2001).

### 2.2. Verbreitung und Rezeption

Zur Verbreitung der LIDAR-Technologie schreibt Fowler (2001: 211): „While research and scientific laser altimetry systems have been deployed for many years by government and academic institutions, only recently has there been a large growth in the number of commercial organizations operating instruments on a ‘for profit’ basis”.

Fowler (2001: 212) stellt die Rezeptionskurve der LIDAR-Technologie zusammen. Mehr als ein Drittel der aufgelisteten Systeme sind in Europa stationiert, über 40% in Nordamerika und der Rest in Asien und Afrika.

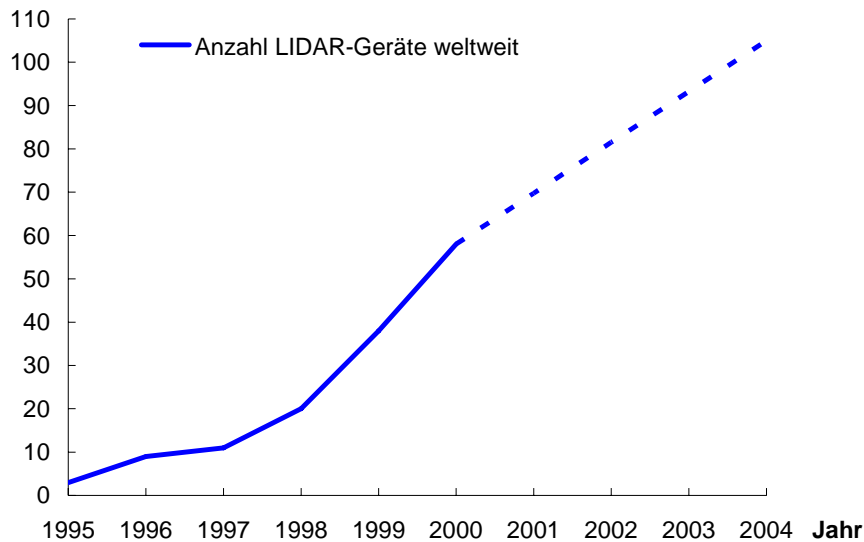


Abb. 1: Kommerzielle Rezeption der LIDAR-Technologie  
Quelle: Fowler 2001 und 2005, eigene Darstellung

Die Zahlen für die Jahre 2001 bis 2004 in der Abbildung 1 beruhen auf einer aktuellen Schätzung von Fowler (2005). Nicht alle der in der Rezeptionskurve aufgeführten LIDAR-Geräte stehen unbedingt in Gebrauch. Andererseits basieren die Zahlen auf den Verkaufsstatistiken der grossen Herstellerfirmen und auf Meldungen von Leuten, die selber LIDAR-Systeme bauen. Es kann davon ausgegangen werden, dass sich die gemeldeten, aber nicht mehr im Gebrauch stehenden LIDAR-Geräte und die nicht gemeldeten in etwa die Waage halten. Es kann also von einer erfolgreichen weltweiten Ausbreitung der LIDAR-Technologie gesprochen werden. Ferner ist anzumerken, dass die heutigen LIDAR-Geräte effizienter sind in der Datenproduktion als die Geräte der ersten Generation und dass sich die globale Abdeckung mit hochauflösenden LIDAR-Daten in den kommenden Jahren weiter verbessern wird.

## 2.3. LIDAR-Daten in der Schweiz

### 2.3.1. Das Projekt «Landwirtschaftliche Nutzflächen»

Das Bundesamt für Landestopografie führt im Auftrag des Bundesamtes für Landwirtschaft das Projekt «Landwirtschaftliche Nutzflächen» (LWN) durch. Dieses hat das Ziel, die landwirtschaftlichen Nutzflächen auf Basis der Amtlichen Vermessung (AV) zu aktualisieren. Das Pro-

jekt wird in zwei Phasen umgesetzt. Die erste Phase wird durch das Bundesamt für Landestopografie durchgeführt und umfasst insbesondere die Erstellung eines digitalen Terrainmodells (DTM-AV) und eines digitalen Oberflächenmodells (DOM-AV) der Schweiz (Swisstopo 2004).

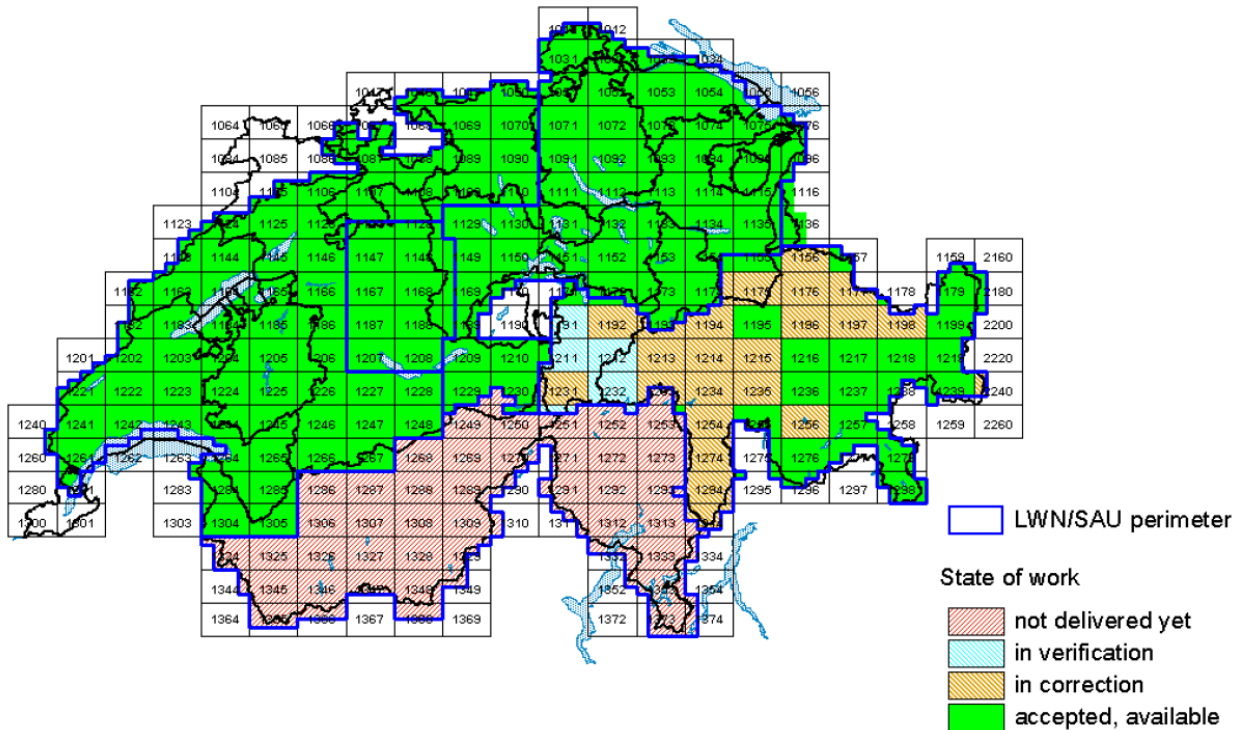


Abb. 2: Produktionsstand des DTM-AV  
Quelle: Swisstopo 2005a

Die Produkte DTM-AV und DOM-AV werden schrittweise ausgebaut (vgl. Abbildung 2). Eine Vollerhebung über das Gebiet der Schweiz sollte gemäss Swisstopo bis spätestens 2007 erstellt sein. Dazu muss aber bemerkt werden, dass DTM-AV und DOM-AV aufgrund ihres spezifischen Verwendungszwecks im Projekt LWN nur für Gebiete unter 2000 Metern Höhe über Meer erstellt werden.

### 2.3.2. Daten im Untersuchungsgebiet

Für die vorliegende Untersuchung werden Daten des DTM-AV im Gebiet Boltigen im Berner Simmental (LK 25'000 Blatt 1226) verwendet. Es handelt sich um die DTM-AV-Kacheln 1226-12, 1226-14, 1226-21 bis 24). Diese Daten wurden freundlicherweise durch das Vermessungsamt des Kantons Bern zur Verfügung gestellt.

Das Gebiet des Blatts 1226 wurde im Rahmen der zweiten Etappe des Projekts LWN aufgenommen. Mit der Datenaufnahme und der Qualitätskontrolle war eine Ingenieurgesellschaft betraut bestehend aus der Swissphoto AG und der amerikanischen Firma Terrapoint. Die ersten

LIDAR-Befliegungen fanden anfangs Dezember 2000 statt. Wegen qualitativer Mängel wurde das Gebiet anfangs Mai 2002 teilweise erneut aufgenommen. Die Metadaten zur Aufnahmeausrüstung und -methodik können der Tabelle im Anhang A1 entnommen werden.

Abbildung 3 zeigt die Lage des Untersuchungsgebiets. Die Region um Boltigen liegt am Alpennordrand westlich des Thunersees.



Abb. 3: Lage des Untersuchungsgebiets  
Quelle: Swisstopo 2005c

Das Gelände im Untersuchungsgebiet ist von Tälern und Bergen geprägt und teilweise stark un-  
duliert. Abbildungen 4 und 5 sind Fotografien, die anlässlich einer Feldbegehung gemacht wor-  
den sind. Abbildung 4 zeigt den Blick aus dem Tal des Wüstenbachs nach Osten. Der Wüsten-  
bach wird im zweiten Teil dieser Arbeit für die Modellierung mit TOPMODEL verwendet. In  
der rechten Bildhälfte von Abbildung 4 ist neben einem Hügelzug das sumpfige Gebiet sichtbar,  
dem der Wüstenbach entspringt. Die linke Bildhälfte zeigt den Fuss des Schafarnisch (vgl. auch  
Abbildung 5). Das Tal des Wüstenbachs geht im oberen Ende in steilere Hänge und teilweise in  
Felswände über. Unter manchen Felswänden finden sich am Hangfuss (inaktive und rezente)  
Schutthalden (vgl. Abbildung 6).





Abb. 4 (oben): Einzugsgebiet  
des Wüstenbachs



Abb. 5 (rechts): Der Schafar-  
nisch



Abb. 6: Felswand im Tal des Wüstenbachs

## 3. Digitale Geländemodellierung

In ihrer grundlegenden Publikation bezeichnen Weibel und Heller (1991) mit «DTM» alle Datenstrukturen, die geeignet sind, topographische Strukturen zu repräsentieren, also TIN, Höhenlinien, Rasterrepräsentation usw. In den eigenständigen Teilen der vorliegenden Untersuchung wird der Begriff «DTM» dann im engeren Sinn nur für Rasterrepräsentationen der Topographie verwendet.

Weibel und Heller (1991: 270) teilen das Feld der Digitalen Geländemodellierung in fünf Kategorien ein:

- Erstellung von DTM:  
Sampling von Daten, Modellkonstruktion anhand unterschiedlicher Datenquellen
- Manipulation von DTM:  
Verfeinern und Anpassen von DTM
- Interpretation von DTM:  
Analyse von und Informationsextraktion aus DTM
- Visualisierung von DTM:  
Graphisches Darstellen von DTM und abgeleiteten Produkten
- Anwendung von DTM:  
Anwendung von DTM in Modellen

In der Folge wird kurz auf die ersten vier Kategorien der Geländemodellierung eingegangen. Zu zwei Kategorien werden jeweils aktuelle Beispiele der Forschung ausführlicher aufgezeigt. Schliesslich wird zur Bedeutung der Forschung in der fünften Kategorie übergeleitet und darin die vorliegende Untersuchung verortet.

Die Forschung im Bereich der Erstellung von DTM befasst sich vor allem mit verschiedenen Datenquellen und mit der Modellkonstruktion. Diese umfasst die Auswahl geeigneter Datenstrukturen und Interpolationsmethoden. Von Hugentobler et al. (2005) stammt eine aktuelle Arbeit über Interpolationsmethoden zur Generierung von kontinuierlichen Oberflächen. Untersucht wurden ein linearer und drei kubische Interpolatoren (Triangular Coons Patch, Clough-Tocher Bezier Splines und Smoothed Clough-Tocher Spline). Die Autoren verwendeten eine mathematisch definierte Oberfläche und ein Testgebiet für das zwei unabhängige Datensätze erstellt worden waren. Der lineare Interpolator produzierte die deutlichsten Artefakte im Testgebiet. Bei der Interpolation der künstlichen Oberfläche wies der lineare Interpolator die grössten Abweichungen auf. Diese lagen vor allem in den für die Geländemodellierung entscheidenden

konvexen und konkaven Geländeformen. Die Gradientenberechnung mittels des linearen Interpolators wies die grössten Abweichungen an Stellen mit geringen Hangneigungswerten auf. Zwischen den drei kubischen Interpolatoren wurden keine grossen Unterschiede festgestellt. Für eine flache Topographie ist die Wahl des Interpolators also wesentlich wichtiger als für steile Landschaften. Ausserdem muss bei der Wahl eines Interpolators der implizite Massstab des Modellierungsgegenstands bedacht werden. Zukünftige Untersuchungen haben zum Ziel, den Einfluss des verwendeten Interpolators auf zusammengesetzte Geländeindizes zu untersuchen und somit für unterschiedliche Anwendungen die geeigneten Interpolatoren benennen zu können.

Der Bereich der Manipulation von DTM befasst sich unter anderem mit der Korrektur von Fehlern, dem Filtern von DTM und Konversionen von Datenstrukturen. Als Beispiel für Forschung im Bereich der Fehlerkorrektur kann die Untersuchung von López (2000) dienen. Er vergleicht drei verschiedene Prozeduren zur Detektion von Fehlern in Raster-DTM. Korrekturoperationen umfassen im weiteren Sinne auch die in dieser Arbeit vorgenommene hydrologische Korrektur eines DTM. Das Filtern von DTM wird primär für das Glätten der Topographie und für die Datenreduktion eingesetzt.

Die Forschung im Bereich der Interpretation von DTM beschäftigt sich mit der visuellen und quantitativen Analyse von digitalen Geländedaten. „The results of interpretation can be used as input to environmental impact studies, soil erosion potential models, hydrological runoff simulations, and many more applications“ (Weibel und Heller 1991: 282). Es werden also Methoden und Algorithmen untersucht, die von DTM Eingangsdaten für Modellierungen ableiten. Eine aktuelle Untersuchung aus diesem Feld stammt von Kienzle (2004). Er untersuchte den Einfluss von unterschiedlich aufgelösten DTM auf diverse Derivate. Dabei verglich er auch zwei Algorithmen zur Berechnung der Hangneigung und der Exposition. Unterschiede in der Schätzung der Hangneigung waren grösser in steilem Gelände. Hangneigungen nach Zevenbergen und Thorne (1987) waren konsistent etwas höher als jene nach Horn (1981). Die Unterschiede fielen aber nicht signifikant aus (Kienzle 2004: 95). Bei der Berechnung des Aspekts konnten keine grossen Unterschiede zwischen den beiden Algorithmen gefunden werden. Jones (1998) untersuchte acht Algorithmen zur Berechnung der Hangneigung und der Exposition. Im Gegensatz zu Kienzle (2004) fand er zum Teil grosse Unterschiede zwischen den Ansätzen und auch populäre Methoden (wie zum Beispiel der *Maximum Downward Gradient*-Ansatz; entspricht einem *Single Steepest Descent*-Algorithmus) ergaben schlechte Resultate. Insbesondere Fragen zur Performanz einzelner Ansätze in topographisch unterschiedlichen Gebieten und in verschiedenen Auflösungen sind nach wie vor aktuell.

Im vierten Bereich, der Visualisierung von DTM, wird die graphische Darstellung von DTM (allenfalls kombiniert mit anderen Daten) untersucht. Erkenntnisse aus diesem Bereich fließen in die Methoden der anderen Bereiche mit ein (Visualisierung zum Beispiel als Hilfsmittel bei der Fehlerdetektion oder bei der Interpretation von DTM).

Das Feld der Anwendung von DTM befasst sich schliesslich mit der Verwendung von DTM in verschiedenen thematischen Gebieten (Vermessung, Ingenieurwesen, Planung und Ressourcenmanagement, Erdwissenschaften, militärische Anwendungen). Untersucht werden vor allem die spezifischen Anforderungen der einzelnen DTM-Anwendungen an die verwendeten Daten, um zum Beispiel möglichst realistische Modellierungen zu erzielen. In diesem Bereich ist die vorliegende Arbeit zu verorten. Es werden die Auswirkungen unterschiedlicher DTM-Auflösungen auf zwei ausgewählte Prozessmodelle untersucht. Dabei stützt sich diese Untersuchung auf Erkenntnisse aus dem Feld der Interpretation von DTM über die Auflösungsabhängigkeit von Terrainderivaten. Schliesslich sollen die anhand der Modelle gewonnenen spezifischen Erkenntnisse vor einem allgemeinen Hintergrund beurteilt und gewichtet werden. Dadurch soll das Verständnis für die Auswirkungen unterschiedlicher Auflösungen von Höhendaten auf die Resultate von Prozessmodellen gefördert werden.



## 4. Fokal aggregierendes Modell: Daisyworld

Daisyworld wurde entworfen, um die Adaption eines einfachen biologischen Systems an sich verändernde Umweltbedingungen zu untersuchen. Im Laufe der Jahre wurde es in immer wieder neuen Versionen für ökologische und evolutionsbiologische Untersuchungen verwendet.

Erstmals wurde Daisyworld 1983 von Watson und Lovelock als eindimensionales Modell vorgestellt. Von Bloh et al. (1997) erweiterten das Modell durch eine zweidimensionale Formulierung. Die einzelnen Elemente dieser flächenhaften Daisyworld (Zellen im Fall einer Rasterrepräsentation) können unbewachsen oder von grundsätzlich zwei Arten von Gänseblümchen (Daisies) bewachsen sein. Es gibt in Daisyworld schwarze und weisse Daisies, beide haben eine unterschiedliche Albedo. Von Bloh et al. (1997) modellierten zusätzlich eine Energiediffusion. Dabei ist die Temperatur an einem Punkt in Daisyworld unter anderem auch vom Bewuchs benachbarter Punkte (und dessen Albedo) abhängig. Die unmittelbare Nachbarschaft entscheidet also mittelbar über den Bewuchs und die empfangene Strahlung und schliesslich über die Umgebungstemperatur darüber, ob an einem Punkt ein Daisy wachsen kann.

Purves (2003) veränderte diese zweidimensionale Daisyworld, um verschiedene Geländerepräsentationen zu untersuchen. Dazu machte er die kurzweilige Einstrahlung an einem Punkt in Daisyworld von der lokalen Hangneigung und der Exposition (Aspekt) abhängig. Die Umgebung einer Rasterzelle beeinflusst die Zentralzelle also zusätzlich über die topographischen Attribute Hangneigung und Exposition. Für die Modellierung wird üblicherweise von einem hinsichtlich der Verteilung der drei Landnutzungen zufälligen Anfangszustand von Daisyworld ausgegangen und das Modell dann einige Tausend Mal iteriert, bis sich Daisyworld (in der Regel) in einem in bezug auf die physikalischen Parameter stabilen (End-)Zustand befindet.

### 4.1. Zellulärautomaten

Die eindimensionale wie die zweidimensionale Daisyworld lassen sich als sogenannte Zellulärautomaten (*cellular automata*) auffassen.

Wolfram (1986: 1) definiert einen Zellulärautomaten wie folgt: „In a simple case, a cellular automaton consists of a line of cells or sites, each with value 0 or 1. These values are updated in a sequence of discrete time steps, according to a definite, fixed, rule.“ Diese Update-Regel bzw. Überführungsregel definiert die Überführungsfunktion  $\Phi$ .

Obige Formulierung kann auf zweidimensionale Zellulärautomaten ausgedehnt werden. Übliche Nachbarschaften für die Funktion  $\Phi$  sind dann die vier direkten Nachbarn (Von-Neumann-Nachbarschaft bzw. *Rook's case*) oder die acht Nachbarn einer Zelle (Moore-Nachbarschaft bzw.

*King's case*). Die Elemente in einem Zelluläutomaten können, gesteuert durch  $\Phi$ , eine endliche Anzahl unterschiedlicher Zustände annehmen.

Folgende Charakteristika eines Zelluläutomaten formuliert Wolfram (1986: 1) als notwendige Bedingungen:

- Räumliche Diskretheit  
Ein Zelluläutomat besteht im zweidimensionalen Fall aus einem diskreten Raster von Zellen.
- Zeitliche Diskretheit  
Der Wert jeder Zelle wird in diskreten Zeitschritten nachgeführt.
- Diskrete Zustände  
Eine Zelle kann eine endliche Anzahl unterschiedlicher Zustände annehmen.
- Homogenität  
Alle Zellen sind identisch und regelmässig angeordnet.
- Synchroner Veränderung  
Alle Zellen werden gleichzeitig nachgeführt. Die Überföhrungsfunktion  $\Phi$  greift dafür auf die Zustände der einbezogenen Nachbarzellen vor dem Zeitschritt zu.
- Deterministische Überföhrungsregel  
Der Wert jeder Zelle wird aufgrund einer deterministischen Regel in den neuen Wert überföhrt.
- Räumlich lokale Überföhrungsregel  
Die Überföhrungsfunktion  $\Phi$ , die auf eine Zelle angewandt wird, hängt nur von einer begrenzten Nachbarschaft der Zelle ab.
- Zeitlich lokale Überföhrungsregel  
Die Überföhrungsregel, die auf eine Zelle angewandt wird, hängt nur von einer begrenzten Anzahl früherer Zustände ab. Üblicherweise wird nur der jüngste Zustand berücksichtigt.

Zelluläutomaten haben häufig deterministische Überföhrungsregeln. Im Widerspruch zum angeführten Charakteristikum der deterministischen Überföhrungsregel gibt es aber auch Zelluläutomaten, in die probabilistische Elemente eingefügt worden sind (Wolfram 1986: 3).

Formal kann ein Zelluläutomat CA durch ein 5-tupel,  $CA = \langle S, d, N, \Phi, q_0 \rangle$ , definiert werden. S bezeichnet dabei ein endliches Set von Zuständen, die jede Zelle annehmen kann. d bezeichnet die Dimensionalität der Raumtessellation, auf der der CA definiert ist. N ist die Nachbarschaft, die von der Überföhrungsfunktion  $\Phi(N, \langle S \rangle)$  berücksichtigt wird, um den neuen Zustand der Zentralzelle zu bestimmen.  $q_0$  bezeichnet den sogenannten Ruhezustand (*quiescent state*). „The

quiescent state is to have the property that if any cell(-machine) and all of its neighbors are in the quiescent state at time  $T - 1$ , the cell(-machine) will be in the quiescent state at time  $T$ " (Moore 1962: 188). Die formale Definition eines Zellulärautomaten wird im folgenden Abschnitt zur Beschreibung von Daisyworld verwendet.

## 4.2. Daisyworld als Zellulärautomat

Der Daisyworld-Zellulärautomat  $CA_{\text{Daisyworld}} = \langle S, d, N, \Phi, q_0 \rangle$  ist wie folgt definiert.

Die Menge  $S$  enthält drei Zustände, die jede Zelle in Daisyworld annehmen kann:

$S$ :  $\langle \text{none, black, white} \rangle$  (none: kein Daisy vorhanden)

Die Dimensionalität der verwendeten Version von Daisyworld ist 2. Als Nachbarschaft  $N$  wird die sogenannte Von-Neumann-Nachbarschaft verwendet (vgl. Abbildung 7).

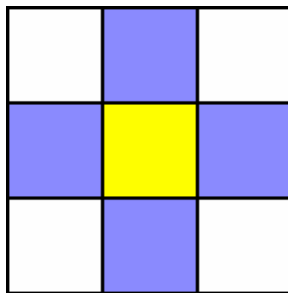


Abb. 7: Von-Neumann-Nachbarschaft

Die Definition der Überföhrungsfunktion  $\Phi$  ist im Fall von Daisyworld relativ komplex. Grundsätzlich sind Daisies in Daisyworld bei Temperaturen von  $5^{\circ}\text{C}$  bis  $40^{\circ}\text{C}$  wuchsfähig. Das Temperaturoptimum sowohl für schwarze als auch für weisse Daisies liegt bei  $22.5^{\circ}\text{C}$  (vgl. Abbildung 8). Wichtig ist festzustellen, dass das temperaturabhängige Wachstum für beide Daisy-Arten identisch definiert ist.

Zur Definition der Überföhrungsfunktion  $\Phi$ :

$\Phi$ :  $S_{\text{Zentralzelle}} = \langle \text{black / white} \rangle$  (die Zentralzelle ist bewachsen)

Es wird geprüft, ob in der betrachteten Zelle Bedingungen herrschen, bei denen das vorhandene Daisy weiter überleben kann. Ist dies einmal nicht mehr gewährleistet, stirbt das Daisy. Aber auch wenn die Temperatur lebensfreundlich (d.h. im Intervall  $[5^{\circ}\text{C}, 40^{\circ}\text{C}]$ ) ist, kann das Daisy sterben. Dies geschieht mit einer Basismortalität von 1%.



$S_{\text{Zentralzelle}} = \langle \text{none} \rangle$  (die Zentralzelle ist unbewachsen)

Das Wachsen eines neuen Daisys ist unter Vorbehalt lebensfreundlicher Temperatur möglich. In einem ersten Schritt wird eine der vier direkten Nachbarzellen der betreffenden Rasterzelle oder die Zelle selbst (Von-Neumann-Nachbarschaft) ausgewählt. In der verwendeten Implementation geschieht dies mit den folgenden Wahrscheinlichkeiten. Die Zentralzelle selbst (gelb in Abbildung 7) wird mit einer Wahrscheinlichkeit von  $1/9$  ausgewählt, die übrigen Zellen (blau) jeweils mit einer Wahrscheinlichkeit von  $2/9$ .

Ist in der ausgewählten Zelle kein Daisy vorhanden, wächst in der Zentralzelle bei lebensfreundlicher Temperatur mit der Wahrscheinlichkeit von  $0.1\%$  trotzdem ein Daisy. Die Farbe des neu entstehenden Daisys ist zufällig.

Ist in der ausgewählten Zelle ein Daisy vorhanden, orientiert sich die Farbe des neu entstehenden Daisys grundsätzlich an jener des ausgewählten Daisys. In einem ersten Schritt wird die Wuchswahrscheinlichkeit  $W$  für in der Zentralzelle herrschende Temperatur berechnet. Mit der Wahrscheinlichkeit  $W$  entsteht in der Zentralzelle ein neues Daisy (vgl. Abbildung 8). Dieses erbt mit  $95\%$  Wahrscheinlichkeit die Farbe des vorgängig ausgewählten Daisys, mit  $5\%$  Wahrscheinlichkeit findet eine Farbmutation statt.

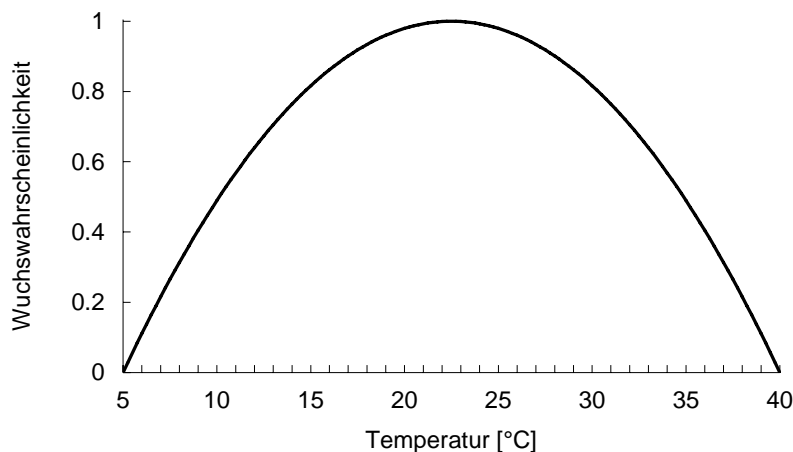


Abb. 8: Verteilung der Wuchswahrscheinlichkeit  $W$  der Daisies über der Temperatur

Die Überföhrungsfunktion  $\Phi$  verletzt geringfügig die Definition des Ruhezustands  $q_0$ . Dieser entspricht in Daisyworld am ehesten dem Zustand  $\langle \text{none} \rangle$ , in dem kein Daisy vorhanden ist. Die Charakteristik des Ruhezustands erforderte, dass die Zentralzelle zum Zeitpunkt  $t$  im Ruhezustand ist, wenn sich die gesamte Nachbarschaft  $N$  zum Zeitpunkt  $t-1$  im Ruhezustand befunden hat. Dies ist aber in der verwendeten Variante von Daisyworld nicht zwingend der Fall. Wie aus der Definition der Überföhrungsfunktion  $\Phi$  hervorgeht, kann die Zentralzelle unter obigen Be-

dingungen mit 0.1%o Wahrscheinlichkeit vom Zustand  $\langle \text{none} \rangle$  in den Zustand  $\langle \text{black} \rangle$  oder  $\langle \text{white} \rangle$  wechseln. Dies stellt eine geringfügige Verletzung der Definition des Ruhezustands dar. Soweit dies abgeschätzt werden kann, hat diese Besonderheit in der Modellierung aber nicht wesentliche Auswirkungen gezeitigt.

Der Daisyworld-Zellulärautomat  $CA_{\text{Daisyworld}}$  lässt sich also formal beschreiben:  
 $CA_{\text{Daisyworld}} = \langle \langle \text{none}, \text{black}, \text{white} \rangle, 2, \text{Von-Neumann-Nachbarschaft}, \Phi, \sim \text{none} \rangle$ ,  
wobei  $\Phi$  wie oben definiert ist.

## 4.3. Modellierung der Umweltbedingungen

### 4.3.1. Energiebilanz

Die Temperatur jeder Zelle in Daisyworld wird bei jedem Iterationsschritt neu berechnet. Die neue Temperatur der Zelle entspricht dabei der alten Temperatur zuzüglich der Energiemengen aus der Wärmediffusion und der kurzwelligeren Einstrahlung an diesem Punkt abzüglich der langwellig abgestrahlten Energie (McGuffie und Henderson-Sellers 1997: 68ff).

In physikalischer Formulierung:

$$\frac{\partial T(x, y, t)}{\partial t} = \frac{1}{C} \cdot \left[ D \cdot \left( \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial y^2} \right) - \sigma \cdot T(x, y, t)^4 + S \cdot (1 - \alpha(x, y, t)) \right] \quad (4.1)$$

T: Temperatur [K]

x, y: Koordinaten [m]

t: Zeit [s]

C: Wärmekapazität [ $\text{J K}^{-1}$ ]

D: Diffusionskonstante [ $\text{W K}^{-1} \text{m}^2$ ]

$\sigma$ : Stefan-Boltzmann-Konstante ( $5.6696 \cdot 10^{-8}$ ) [ $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-4}$ ]

S: Eintreffende kurzwellige Strahlung (abhängig von Hangneigung und Exposition) [ $\text{W m}^{-2}$ ]

$\alpha$ : Albedo (dimensionslos)

### 4.3.2. Kurzwellige Einstrahlung

Für die Berechnung der kurzwelligen Einstrahlung an jedem Punkt in Daisyworld werden die Formeln wie sie in Barry (1992: 78) gegeben sind, verwendet. In die Berechnung der potentiellen kurzwelligen Einstrahlung gehen die topographischen Attribute Hangneigung und Exposition ein. Diese werden in der modellierten Daisyworld mittels Java-Methoden berechnet. Für die Mo-

dellierung der tatsächlich einfallenden kurzwelligen Strahlung wird dann zusätzlich die Albedo für jeden Punkt in Daisyworld bestimmt. Diese hängt davon ab, ob am betrachteten Standort ein weisses (Albedo 0.95) oder ein schwarzes (Albedo 0.1) Daisy wächst. Existiert gerade kein Daisy, wird die Albedo der unbedeckten Erde mit 0.5 angenommen.

Die Erwärmung infolge der an einem Punkt eintreffenden Strahlungsenergie wird gemäss Formel (4.2) berechnet.

$$\frac{\partial T_{kurzwellig, ein}}{\partial t} = \frac{S \cdot (1 - \alpha(x, y, t))}{C} \quad (4.2)$$

S: Eintreffende kurzwellige Strahlung (potentielle Einstrahlung unter Berücksichtigung von Hangneigung und Exposition) [ $\text{W m}^{-2}$ ]

$\alpha$ : Albedo (dimensionslos)

C: Wärmekapazität [ $\text{J K}^{-1}$ ]

### 4.3.3. Langwellige Abstrahlung

Die langwellige Abstrahlung eines Körpers hängt gemäss dem Stefan-Boltzmann-Gesetz von der Temperatur des betrachteten Körpers – in unserem Fall der betrachteten Zelle in Daisyworld – ab. Der Wärmeverlust durch langwellige Abstrahlung einer Zelle berechnet sich gemäss (4.3).

$$\frac{\partial T_{langwellig, aus}}{\partial t} = - \frac{\sigma \cdot T(x, y, t)^4}{C} \quad (4.3)$$

$\sigma$ : Stefan-Boltzmann-Konstante ( $5.6696 \cdot 10^{-8}$ ) [ $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-4}$ ]

T: Temperatur [K]

C: Wärmekapazität [ $\text{J K}^{-1}$ ]

### 4.3.4. Wärmediffusion

Die Modellierung der Diffusion bei jeder Iteration stützt sich auf die Temperatur, wie sie in Daisyworld zum Zeitpunkt vor dem jeweiligen Diffusionsschritt geherrscht hat.

$$\frac{\partial T_{diff}}{\partial t} = \frac{D}{C} \cdot \left( \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial y^2} \right) \quad (4.4)$$

D: Diffusionskonstante [ $\text{W K}^{-1} \text{m}^2$ ]

C: Wärmekapazität [ $\text{J K}^{-1}$ ]

T: Temperatur [K]

Die Berechnung nach Formel (4.4) wird auf dem Temperaturn raster ohne Ränder durchgeführt, da auf den Rändern die Terme, die auf der Temperatur in der unmittelbaren Nachbarschaft der betrachteten Zelle basieren, gezwungenermassen undefiniert sind. Die Diffusionswerte der Ränder werden analog der Werte ihrer nach innen verschobenen Nachbarpunkten gesetzt.

## 4.4. Erweiterungen von Daisyworld

Daisyworld wurde von Purves (2003) in Java implementiert. Für die vorliegende Untersuchung wurden in einigen Klassen Änderungen bzw. Ergänzungen vorgenommen.

In dieser Untersuchung wurde für alle Modellierungsdurchläufe ein äquivalenter Ausgangspunkt vorgesehen, um die einzelnen Modellierungen unterschiedlicher Auflösung besser vergleichbar zu machen. Anders als in Daisyworld eigentlich vorgesehen, wird nicht von einem zufälligen Anfangszustand ausgegangen. Vielmehr gleicht Daisyworld in der verwendeten Implementation zu Beginn (Iteration 0) einem Schachbrett (vgl. Abbildung 9).

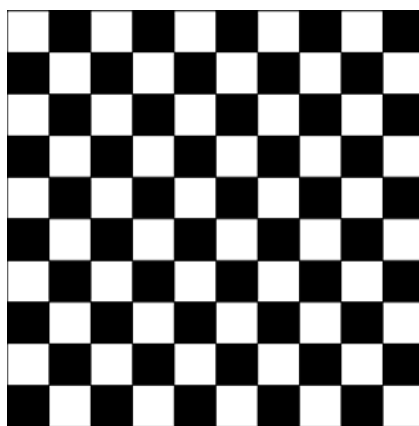


Abb. 9: Anfangszustand von Daisyworld

Unmittelbar nach der Initialisierung von Daisyworld wachsen also ungefähr gleich viele schwarze wie weisse Daisies. Ganz Daisyworld ist von Vegetation bedeckt, es gibt *a priori* keine unbe-

wachsene Rasterzellen. Diese Startbedingungen gelten für alle Modellierungsdurchläufe, egal in welcher Auflösung sie gerechnet wurden.

Des Weiteren wurde eine Steuerungsklasse für die Modellierungsdurchgänge dieser Untersuchung programmiert. Diese Klasse ist mit zusätzlicher Analyse-Funktionalität versehen. So erlaubt sie die Ausgabe diverser statistischer Masse wie auch von Momentaufnahmen aus Daisyworld. Die Klasse ist in der Lage, für jeden Modellierungsdurchlauf eine Statistikdatei zu schreiben. Diese enthält die Anzahlen von Individuen beider Spezies wie auch unbewachsener Rasterzellen sowie diverse Mittelwerte, die über ganz Daisyworld, pro Spezies und für die Klasse unbewachsener Zellen erhoben werden. Diese Mittelwerte umfassen eintreffende kurzweilige Strahlung, Hangneigung und Temperatur.

Für beide Spezies und für die Klasse unbewachsener Rasterzellen kann auch eine Art Längsschnittraster ausgegeben werden. Diese sind eigentliche Zählraster. Sie registrieren für jede Rasterzelle, wie oft diese von einem weissen oder schwarzen Daisy bewachsen und wie oft sie unbewachsen war.

## 4.5. Lokale Eigenschaften und fokale Einflüsse

Die potentielle lokale Einstrahlung ist in Daisyworld von der Hangneigung und der Exposition dieses Punktes abhängig. Obwohl wir Hangneigung und Exposition im Prinzip als lokale Eigenschaften eines Punktes ansehen können, wirken auf sie bei der konkreten Berechnung mittels GIS-Methoden fokale Einflüsse. In Daisyworld werden diese beiden Grössen über finite Differenzen unter Einbezug der 8 benachbarten Rasterzellen berechnet, d.h. in die Approximation von Hangneigung und Exposition in einer Rasterzelle fliesst unmittelbar die Nachbarschaft der Zelle mit ein.

Wieviel kurzweilige Einstrahlung eine Zelle in Daisyworld tatsächlich erhält, hängt neben der potentiellen Menge eintreffender Strahlung auch von der Albedo an diesem Punkt ab (vgl. Formel (4.2), S. 18). Dies ist für sich betrachtet wiederum eine lokale Eigenschaft und die kurzweilige Einstrahlung wird denn auch für jede Rasterzelle einzeln modelliert. Jedoch spielen bei der Entscheidung, welche Spezies an einem Punkt wächst bzw. ob an einem Punkt gar nichts wächst, wiederum fokale Eigenschaften eine Rolle. Einerseits kommt bei einer allfälligen Besiedlung einer unbewachsenen Rasterzelle ein Zellulärautomat zum Zug, der in den meisten Fällen die Farbe des neuen Daisys mit Blick auf dessen Nachbarschaft bestimmt. Andererseits bestimmen lokal approximierte Grössen wie Hangneigung und Exposition mittelbar über die kurzweilige Einstrahlung einen Teil der Wärmemenge, die an einem Ort zur Verfügung steht. Abhängig von

der lokalen Temperatur ist ein weisses oder ein schwarzes Daisy biologisch betrachtet „fitter“. Weisse Daisies kühlen sich durch ihre hohe Albedo tendentiell ab, während schwarze Daisies sich selbst (und damit auch ihre Nachbarschaft) eher erwärmen. Als mittelnde Grösse wirkt zusätzlich die räumliche Wärmediffusion, die dazu tendiert, Wärmeunterschiede zwischen benachbarten Rasterzellen auszugleichen.

Unter der Oberfläche der Daisyworld-Modellierung wirken also zum Teil lokale Grössen, überwiegend aber fokale bzw. fokal approximierte Grössen. Das Modell kann also als fokal aggregierendes Modell angesehen werden.

## 4.6. Verwendete Geländemodelle

Für die Modellierung mit Daisyworld wurde ein Ausschnitt aus dem Untersuchungsgebiet bei Boltigen ausgewählt. Daisyworld hat die schweizerischen Landeskoordinaten 594300/166150 bis 594600/166450. Es besteht also aus einem Quadrat mit einer Kantenlänge von 300 Metern (vgl. Abbildung im Anhang A2 und Abbildung 10). Daisyworld liegt an einem relativ steilen, nach Süden gerichteten Hang am Fuss des Schafarnisch. Der obere (rechte) Teil umfasst steil einfallende Felswände. Der Hang läuft nach unten relativ flach aus.

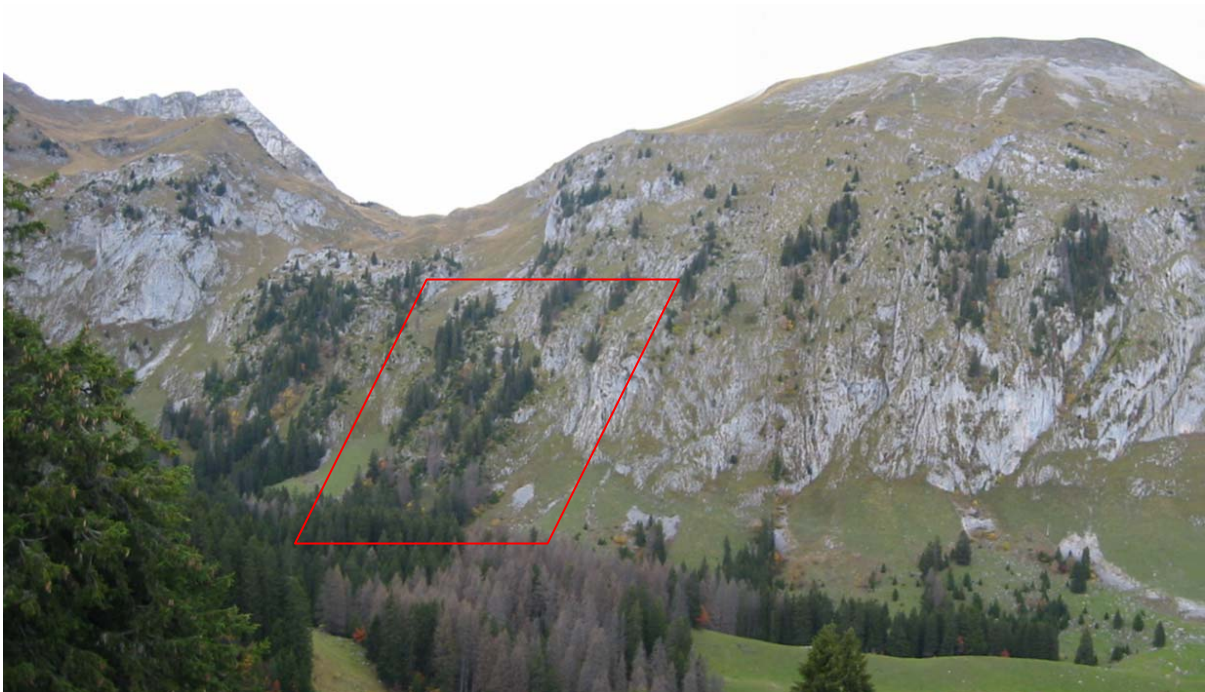


Abb. 10: Lage von Daisyworld am Schafarnisch

Es wurden fünf verschiedene Modellierungen von Daisyworld durchgeführt. Diese unterscheiden sich einzig in den zugrundeliegenden DTM. Diese haben die Auflösungen 1, 2.5, 5, 10 und 20 Meter. Diese Auflösungen stellen (bis auf diejenige von 1 Meter) eine geometrische Reihe dar, was die Verarbeitung und Vergleiche zwischen den einzelnen Datensätzen bzw. Modellierungen erleichtert. Alle Auflösungen sind so gewählt, dass sich die Kantenlänge von Daisyworld ganzzahlig durch die Auflösung dividieren lässt. Das beschriebene Quadrat lässt sich also in allen Auflösungen exakt darstellen.

Die DTM sind aus den gefilterten LIDAR-Punktdaten abgeleitet worden. Das quadratische Untersuchungsgebiet 594270/166120 bis 594630/166480 enthielt 90'474 Datenpunkte. Dies entspricht einer Punktdichte von ungefähr  $0.7$  Punkten/m<sup>2</sup>. Diese Kenngröße wurde zur Interpolation herangezogen. Diese wurde mit dem einfachen *Inverse Distance Weighted*-Algorithmus (IDW) mit Exponent zwei ausgeführt. Die Interaktionsparameter wurden wie in Tabelle 1 gewählt.

Tab. 1: Parameter der IDW-Interpolation für Daisyworld

Auflösung DTM	Anzahl Punkte	Maximale Distanz
1 Meter	3 (0.6981)	–
2.5 Meter	5 (4.3631)	–
5 Meter	20 (17.4525)	10 Meter
10 Meter	70 (69.8102)	20 Meter
20 Meter	280 (279.2407)	40 Meter

(Anzahl Punkte: Werte in Klammern geben die aufgrund der Punktdichte des gesamten Gebiets erwartete Punktzahl in einer Rasterzelle an)

Reliefdarstellungen der erstellten DTM sind in den Abbildungen 11a bis e abgebildet.

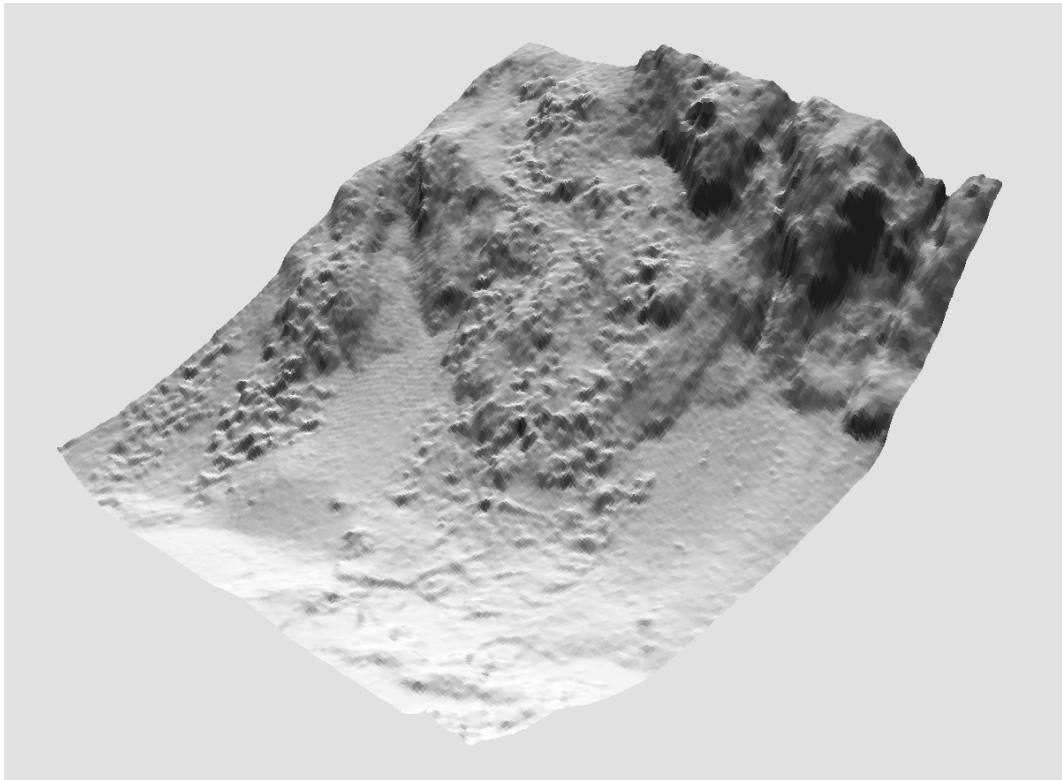


Abb. 11a: Daisyworld-DTM mit 1 Meter Auflösung

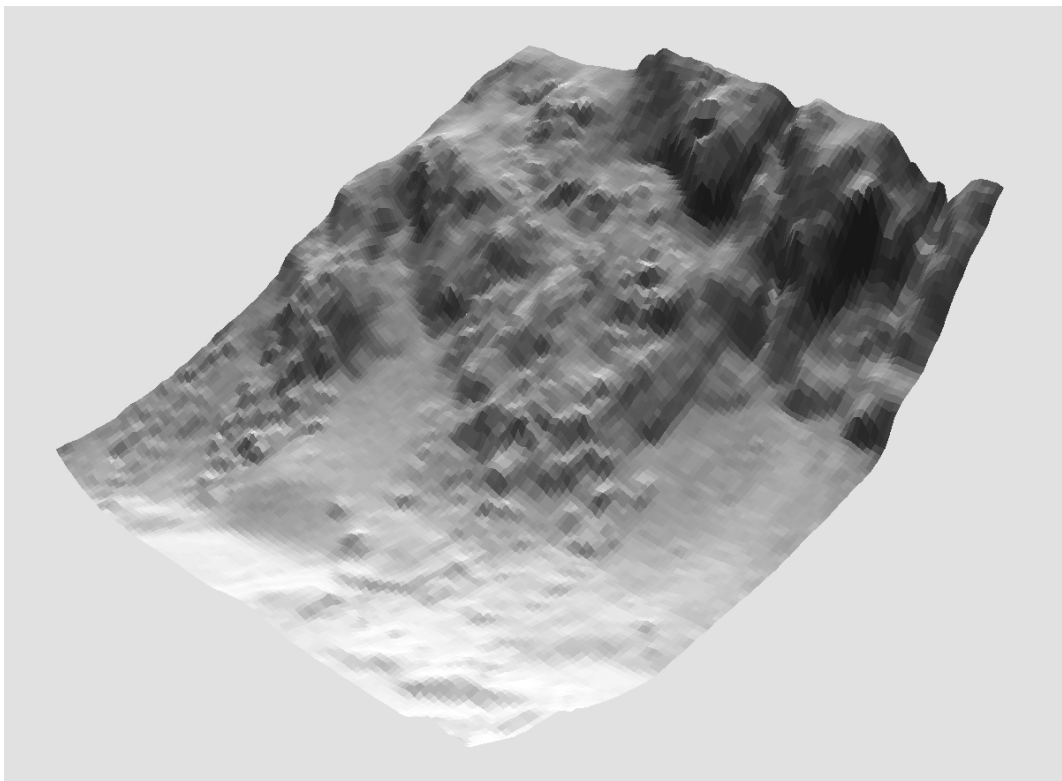


Abb. 11b: Daisyworld-DTM mit 2.5 Metern Auflösung



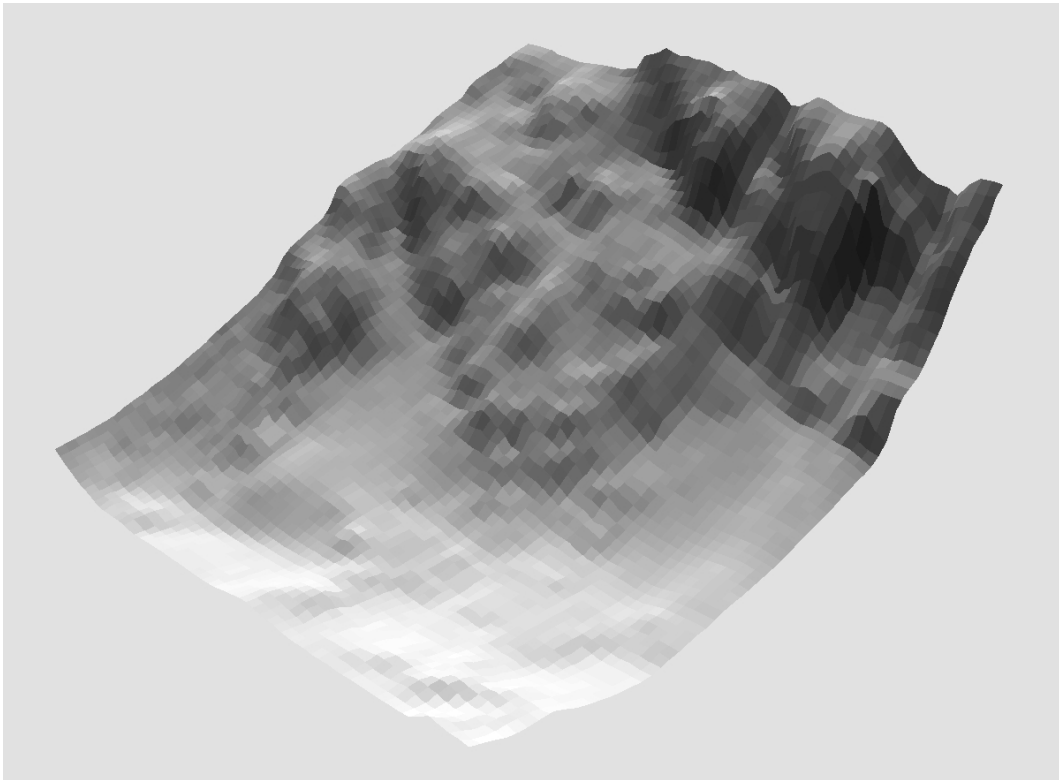


Abb. 11c: Daisyworld-DTM mit 5 Metern Auflösung

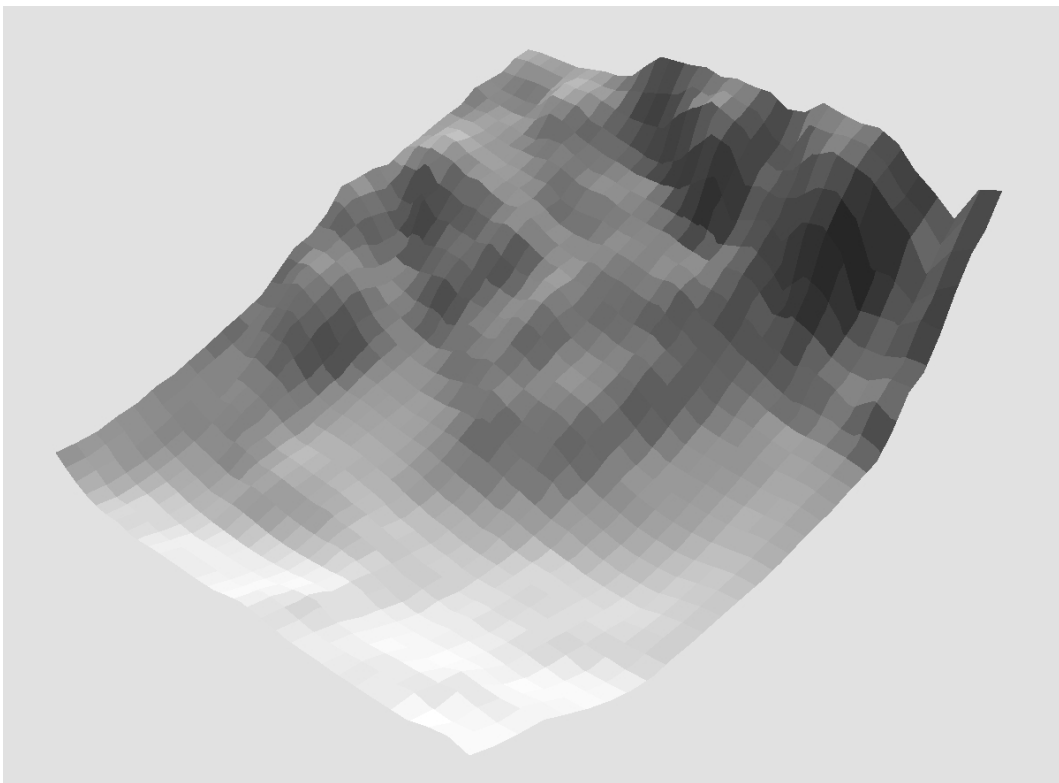


Abb. 11d: Daisyworld-DTM mit 10 Metern Auflösung

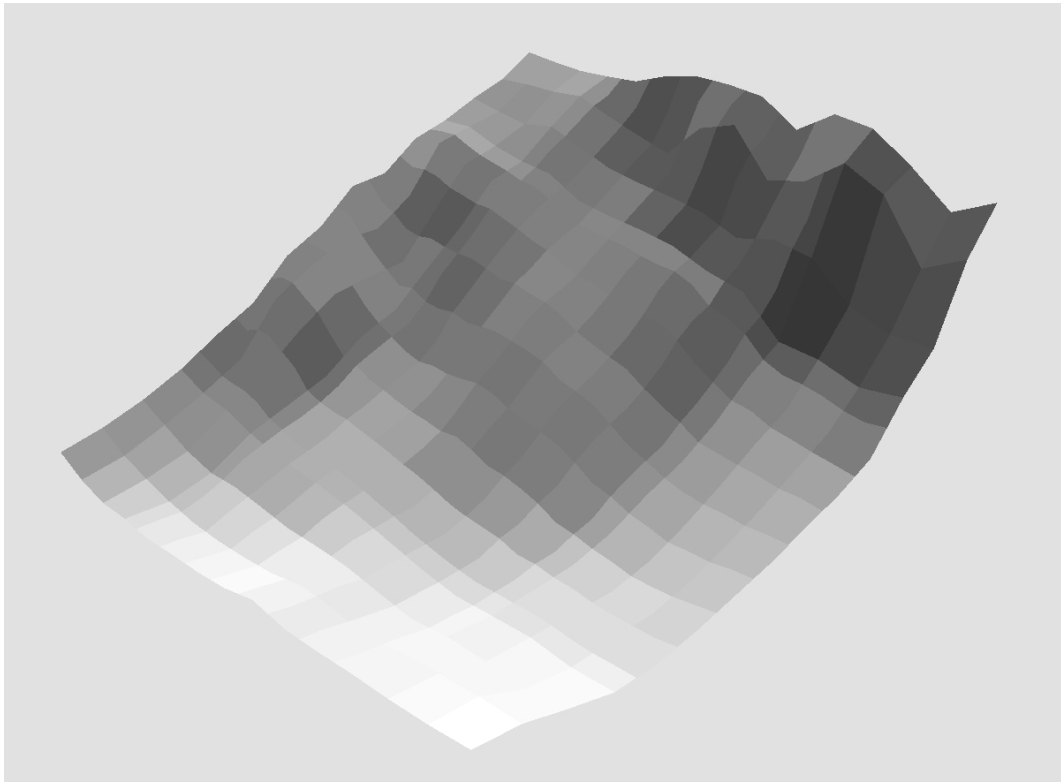


Abb. 11e: Daisyworld-DTM mit 20 Metern Auflösung

## 4.7. Ablauf der Modellierungen

Die Modellierungsparameter für die einzelnen Daisyworld-Durchgänge wurden wie folgt gewählt.

### *Physikalische Parameter und Konstanten*

Zeit: Julianischer Tag 173 (22. Juni), 12 Uhr mittags

Kurzwellige Einstrahlung:  $1250 \text{ W m}^{-2}$

Initialtemperatur:  $24 \text{ }^\circ\text{C}$

Diffusionskonstante:  $500 \text{ W K}^{-1} \text{ m}^2$

Wärmekapazität:  $2500 \text{ J K}^{-1}$

Stefan Boltzmann-Konstante:  $5.6696 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$

Geographische Breite:  $46.65^\circ$  Nord

### *Biologische Parameter*

Lebensfreundliche Temperatur für Daisies:  $[5 \text{ }^\circ\text{C}, 40 \text{ }^\circ\text{C}]$

Albedo: weiss: 0.95, schwarz: 0.1, Boden: 0.5

Wahrscheinlichkeit für genetische (Farb)Mutation: 5%

Basismortalität: 1%

Für jede der fünf Auflösungen wurden Modellierungsdurchgänge à 10'000 Iterationen durchgeführt. Nach dieser Anzahl von Iterationen befindet sich die hier untersuchte Daisyworld in einem hinsichtlich der physikalischen Parameter in einem relativ stabilen Endzustand. Für die Untersuchung wurden für alle Auflösungen jeweils 5 solche Modellierungsläufe erstellt.

## 5. Resultate und Diskussion Daisyworld

In den Abschnitten 5.1 bis 5.4 werden drei Forschungsfragen aufgegriffen:

- Gibt es abhängig von der Auflösung der Eingangs-Höhendaten Unterschiede in den Resultaten eines fokal aggregierenden Modells?

Wenn es Modellierungsunterschiede gibt:

- Wie lassen sich die Unterschiede charakterisieren?
- Lassen sich die räumlichen Gebiete, in denen die Unterschiede besonders stark sind, charakterisieren?

Im Abschnitt 5.5 wird dann der letzten Forschungsfrage für die Untersuchung anhand Daisyworld nachgegangen:

- Welche möglichen Ursachen für Modellierungsunterschiede können ausgemacht werden?

Für die Beantwortung der Forschungsfragen werden in den Abschnitten 5.1 bis 5.3 statistische Auswertungen sowohl räumlich wie nicht-räumlich vorliegender Modellgrößen vorgenommen und analysiert. Im Abschnitt 5.4 erfolgt die räumliche Betrachtung der Modellierungsergebnisse anhand von Dominanzrastern, die sich von den im Abschnitt 4.4 beschriebenen Zählrastern ableiten, sowie anhand von Querschnittrastern, die wiederum auf den Dominanzrastern basieren.

Abbildung 12 zeigt drei Zählraster als Resultat der Modellierung von Daisyworld in 2.5 Metern Auflösung. Aus den drei Zählrastern kann ein Dominanzraster gewonnen werden, indem über einen gesamten Modellierungslauf – in Abbildung 12 der Modellierungslauf 1 der Auflösung 2.5 Meter – die jeweils dominierende Bewuchsart pro Zelle ermittelt wird (also die, welche in den meisten Iterationen vorkam). So erhält man pro Modellierungslauf ein Raster, das Aussagen über die dominante Vegetationsform an einem Ort in Daisyworld ermöglicht. Dabei kann die dominante Vegetationsform einer Zelle auch „unbewachsen“ sein.

Vergleicht man das Dominanzraster aus Abbildung 12 mit den Hangneigungswerten in Abbildung 13, sind Zusammenhänge zwischen der Steilheit des Geländes und der dominanten Bewuchsart erkennbar. Diesen Zusammenhängen wird in den nächsten Abschnitten eingehender nachgegangen.

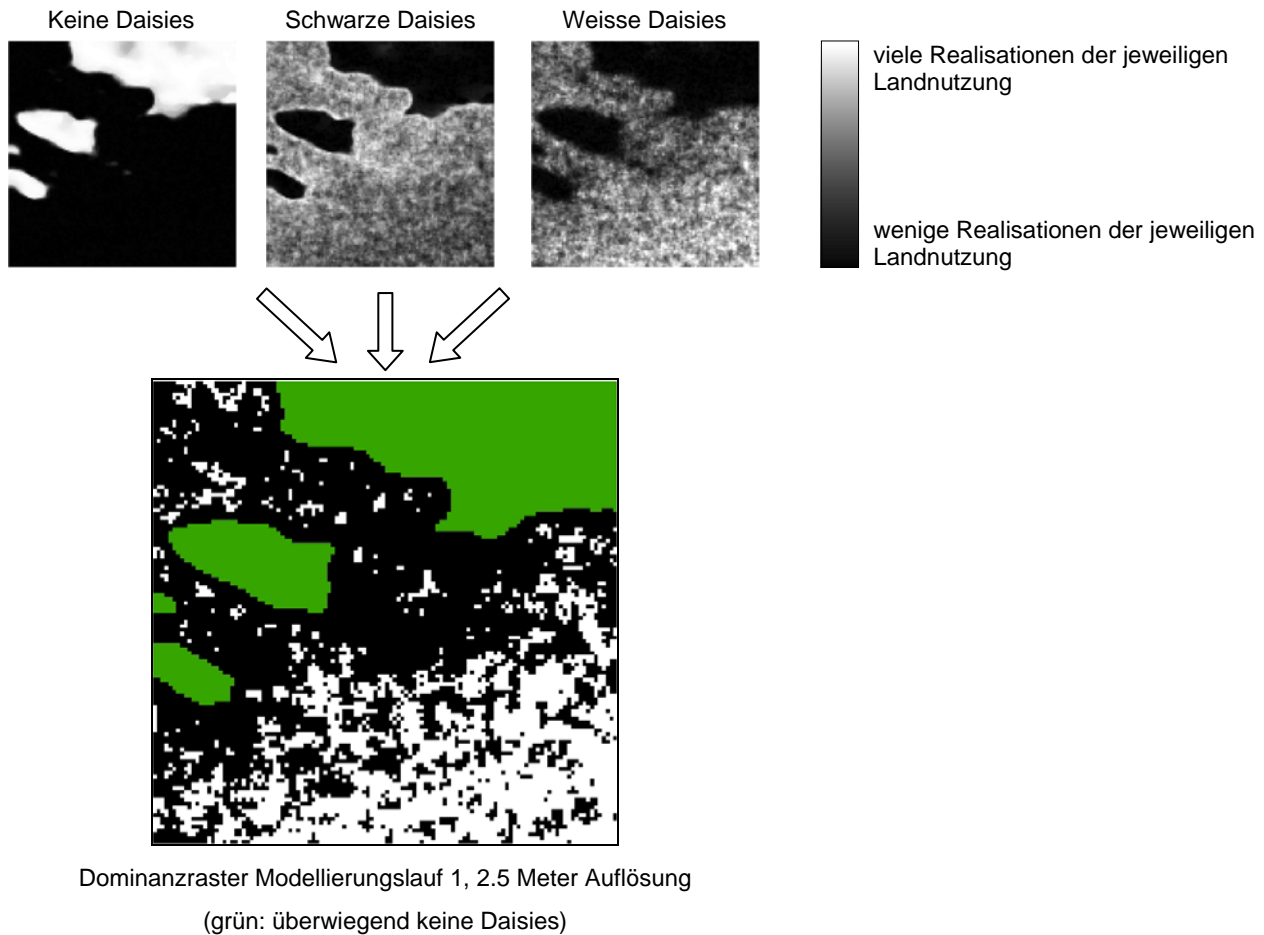


Abb. 12: Generierung eines Dominanzrasters aus drei Zählrastern am Beispiel des Modellierungslaufs 1 der Auflösung 2.5 Meter

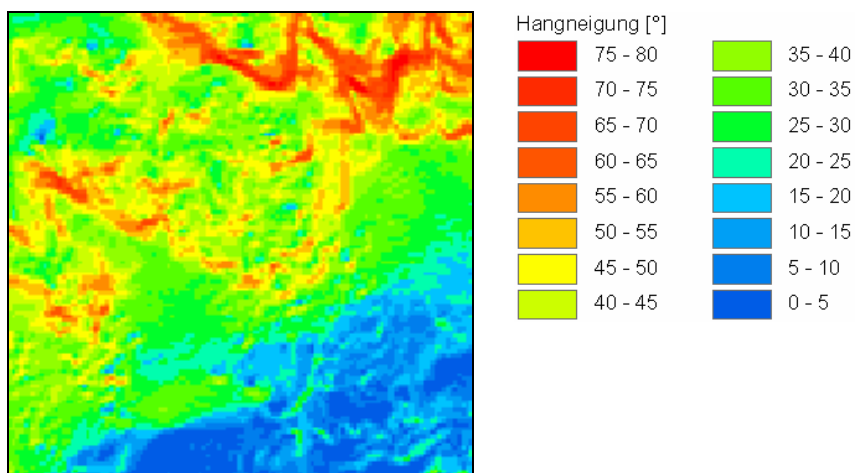


Abb. 13: Hangneigung in Daisyworld in der Auflösung 2.5 Meter

## 5.1. Ähnlichkeit der Zählraster

In einem ersten Schritt wurde die Ähnlichkeit der Zählraster der drei Landnutzungsarten (weisse Daisies, schwarze Daisies, unbewachsen) untersucht. Wenn eine Ähnlichkeit der Raster untereinander gegeben ist, zeigt dies, dass für Modellierungen mit demselben Geländemodell ähnliche Verteilungsmuster der Daisies und unbewachsener Zellen resultieren. Dies wiederum würde implizieren, dass die der Modellierung zugrundeliegende Geländerepräsentation für die resultierende Anordnung der Landnutzungen von Bedeutung ist.

Um die Ähnlichkeit der Zählraster für weisse und schwarze Daisies sowie unbewachsene Zellen zu überprüfen, wurden in ESRI's ArcINFO Korrelationen zwischen den Rastern gerechnet. Die Zählraster der fünf Modellierungsläufe wurden jeweils gegenseitig miteinander in Beziehung gesetzt. Daraus resultierten pro Zellzustand (Landnutzung) zehn Korrelationswerte, deren Mittelwerte in Tabelle 2 zusammengefasst sind.

Tab. 2: Gemittelte Korrelationswerte für jeweils 5 Zählraster pro Landnutzung und Auflösung

Auflösung DTM	Unbewachsen	Schwarze Daisies	Weisse Daisies
1 Meter	0.99612	0.87206	0.86626
2.5 Meter	0.99476	0.88606	0.86173
5 Meter	0.99307	0.92730	0.90658
10 Meter	0.97661	0.94270	0.96324
20 Meter	0.95436	0.91341	0.97560

Je näher ein Korrelationswert bei 1 liegt, desto stärker ist die (positive) Korrelation. Umgangssprachlich würden wir von der Ähnlichkeit der jeweils verglichenen Raster sprechen.

Wegen der unterschiedlich grossen Anzahl Freiheitsgrade bei unterschiedlichen Rasterauflösungen können die Korrelationswerte verschiedener Auflösungen nicht ohne weiteres miteinander verglichen werden. Der Vergleich zwischen den Korrelationswerten unterschiedlicher Landnutzungen innerhalb einer Auflösungsstufe ist aber möglich und erlaubt.

Grundsätzlich sind alle untersuchten Zählraster sehr stark miteinander korreliert. Dies spricht insbesondere dafür, dass die resultierenden Zählraster nicht zufällig entstanden sind, sondern dass sich gewisse Muster in der räumlichen Verteilung der Landnutzungen in unterschiedlichen Modellierungsläufen mit demselben Geländemodell immer wieder ähnlich manifestieren.

Weiter lässt sich anhand dieser Analyse sagen, dass das Auftreten unbewachsener Zellen in der Regel determinierter ist als das Vorkommen von schwarzen bzw. weissen Daisies. Die Korre-

tionswerte für die Zählraster unbewachsener Zellen sind fast durchwegs höher als die Korrelationswerte für die beiden Daisy-Arten. Einzige Ausnahme hierzu ist die Auflösung von 20 Metern, wo der Korrelationswert für weisse Daisies etwas höher liegt als jener der unbewachsenen Zellen. In den drei feinsten Auflösungen sind die Korrelationswerte für schwarze Daisies höher als jene für weisse. Dieser Sachverhalt kehrt sich für die beiden größten Auflösungen um. Jedoch sind die Unterschiede der weissen und schwarzen Korrelationswerte im Vergleich zur Dominanz der Korrelation unbewachsener Zellen in den meisten Auflösungen verhältnismässig klein.

## 5.2. Autokorrelation der Zählraster

Die räumliche Autokorrelation ermöglicht Aussagen über die Verteilung eines Merkmals im Raum. Es können grundsätzlich drei typische Fälle unterschieden werden: das untersuchte Merkmal tritt räumlich gruppiert auf, die räumliche Verteilung des Merkmals ist zufällig oder das Merkmal tritt kontrastierend (zum Beispiel als Schachbrett-Muster) auf (O’Sullivan und Unwin 2003: 167ff).

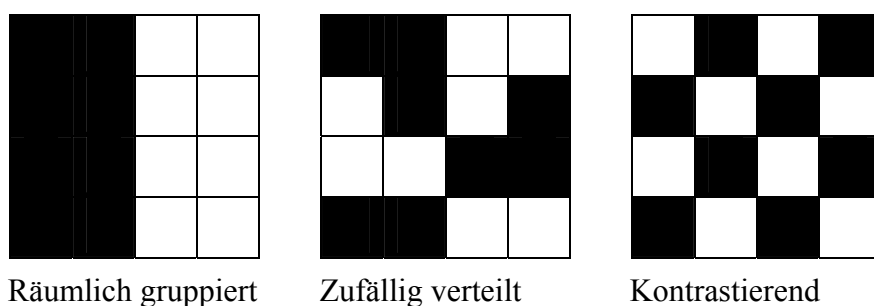


Abb. 14: Beispiele zur räumlichen Autokorrelation von Rastern

In ESRI's ArcINFO können diverse gebräuchliche Masse für die räumliche Autokorrelation berechnet werden. In dieser Untersuchung wurde *Moran's I* (ESRI 2004) verwendet.

$$I = \left( \sum_i^n \sum_j^n w_{ij} \cdot (z_i - z_m)(z_j - z_m) \right) / \left( \sum_i^n \sum_j^n w_{ij} \right) \cdot \left( \sum_i^n (z_i - z_m)^2 / n \right) \quad (5.1)$$

- n: Anzahl Rasterzellen
- i, j: direkt benachbarte Rasterzellen
- $z_i, z_j$ : Wert der Zelle i bzw. j
- $z_m$ : mittlerer Zellwert des ganzen Rasters

$w_{ij}$ : Lageähnlichkeit von  $i$  und  $j$

$$w_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{wenn } i \text{ und } j \text{ direkte Nachbarn sind (Rook's Case)} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

Interpretation (vgl. Abbildung 14):

$I > 0$  Das Merkmal liegt regionalisiert, geclustert vor.

$I = 0$  Das Merkmal liegt unkorreliert, zufällig vor.

$I < 0$  Das Merkmal liegt kontrastierend vor (zum Beispiel als Schachbrett-Muster).

Tabelle 3 zeigt die Autokorrelationswerte der Zählraster gemäss *Moran's I* für die fünf untersuchten Modellierungsläufe. Die letzte Spalte gibt die gemittelten Autokorrelationswerte pro Auflösung und pro Landnutzung.

Tab. 3: Werte von Moran's I für die einzelnen Zählraster

Auflösung	Bewuchs	Lauf 1	Lauf 2	Lauf 3	Lauf 4	Lauf 5	Mittelwert
1 Meter	Schwarz	0.9542	0.9545	0.9538	0.9544	0.9542	0.9542
	Weiss	0.9515	0.9529	0.9519	0.9522	0.9522	0.9521
	Kein	0.9981	0.9980	0.9980	0.9981	0.9981	0.9981
2.5 Meter	Schwarz	0.9311	0.9325	0.9321	0.9333	0.9328	0.9324
	Weiss	0.9344	0.9342	0.9318	0.9359	0.9333	0.9339
	Kein	0.9859	0.9868	0.9873	0.9869	0.9871	0.9868
5 Meter	Schwarz	0.9096	0.9065	0.9099	0.9106	0.9090	0.9091
	Weiss	0.9299	0.9296	0.9316	0.9268	0.9291	0.9294
	Kein	0.9641	0.9632	0.9637	0.9653	0.9630	0.9639
10 Meter	Schwarz	0.8659	0.8737	0.8870	0.8864	0.8919	0.8810
	Weiss	0.9327	0.9354	0.9398	0.9385	0.9355	0.9364
	Kein	0.9127	0.9179	0.9253	0.9238	0.9260	0.9211
20 Meter	Schwarz	0.7630	0.7537	0.7273	0.7254	0.7466	0.7432
	Weiss	0.8862	0.8863	0.8848	0.8834	0.8849	0.8851
	Kein	0.8119	0.8009	0.7916	0.7860	0.7984	0.7978

Wie aus Tabelle 3 ersichtlich, weisen alle Zählraster eine mehr oder minder starke Autokorrelation auf. Die Zählraster der Auflösung 20 Meter fallen im Gesamtbild etwas ab. Ihre Autokorrelationswerte sind alle tiefer als die sämtlicher anderer Auflösungen. Mit 0.74 bis 0.89 sind sie aber immer noch ziemlich hoch.



Alle Zähleraster aus Daisyworld sind autokorreliert. D.h. die räumliche Verteilung der schwarzen und weissen Daisies sowie der unbewachsenen Rasterzellen ist räumlich eher gruppiert bzw. geclustert und nicht zufällig oder kontrastierend. Insbesondere die unbewachsenen Zellen scheinen mit Blick auf die Autokorrelationswerte in jeder Auflösung (ausser in der von 20 Metern) sehr stark räumlich gruppiert aufzutreten.

### 5.3. Statistische Betrachtung von Modellierungsgrössen

In diesem Abschnitt sind diverse Abbildungen (Verlaufskurven, Diagramme) enthalten. Wo nicht anders angezeigt, stehen in diesen Abbildungen schwarz und weiss für die Daisies der jeweiligen Farbe, grün für unbewachsene Zellen und rot für ganz Daisyworld.

Zu Beginn aller Modellierungsdurchgänge gleicht Daisyworld einem Schachbrett. Die Anfangsbedingungen sind so, dass ungefähr  $0.5 \cdot n = 0.5 \cdot (300\text{m}/\text{Auflösung})^2$  schwarze und weisse Daisies vorhanden sind. Die schachbrettartige Verteilung der Daisies kann als Sampling des Untersuchungsgebiets verstanden werden. Die regelmässig wechselnde Anordnung der Daisies führt dann dazu, dass Parameter wie zum Beispiel Hangneigung zu Beginn der Modellierung für beide Spezies ungefähr denselben Mittelwert aufweisen (vgl. dazu Abschnitt 5.3.2).

#### 5.3.1. Anteile der Landnutzungen

Wie bereits in Abschnitt 4.4 erwähnt, ist in der Modellierung vorgesehen, dass zu Beginn keine Zelle unbewachsen ist. Dieser Umstand führt dazu, dass im folgenden die Kurve für unbewachsene Rasterzellen stets bei 0 beginnt, während die Kurven für Daisies jeweils bei ungefähr 50% einsetzen.

#### 20 Meter Auflösung

Schon nach wenigen dutzend Iterationen steigt die Zahl unbewachsener Rasterzellen an. Nach einigen hundert Iterationen gibt es bereits mehr unbewachsene Zellen als solche mit weissen Daisies. Nach im Mittel etwa 3000 Iterationen übersteigt die Anzahl unbewachsener Zellen auch diejenige schwarzer Daisies. In einzelnen Modellierungsdurchgängen schwingt die Anzahl schwarzer Daisies aber immer wieder mal über diejenige unbewachsener Zellen.

Zum Schluss der Modellierung sind die meisten Zellen unbewachsen (43%), gefolgt von Zellen mit schwarzen (36%) und mit weissen Daisies (21%).

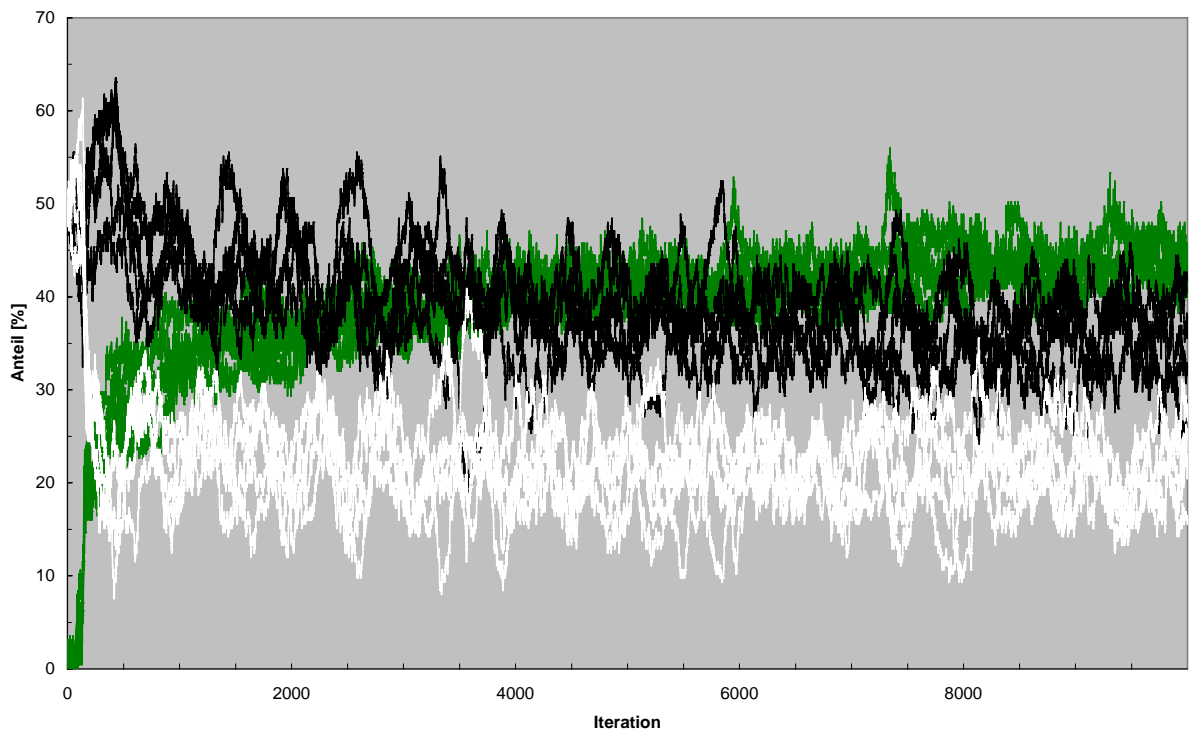


Abb. 15: Verlauf der Anteile der Landnutzungen der Auflösung 20 Meter für 5 Läufe à 10'000 Iterationen

Die Schwankungen in den Anteilen sind sehr gross und recht abrupt. Die Kurven oszillieren alle sehr stark. Dies kann wohl dadurch erklärt werden, dass die Änderung am Bewuchs einer einzigen Rasterzelle in dieser Auflösung einen vergleichsweise grossen Effekt auf das ganze System nach sich zieht.

### 10 Meter Auflösung

Auch bei dieser Auflösung steigt der Anteil unbewachsener Rasterzellen kurz nach der Initialisierung von Daisyworld stark an. Anders als bei 20 Metern Auflösung übersteigt der Anteil unbewachsener Zellen denjenigen weisser und schwarzer Daisies im Mittel nicht. Nur in einem Teil der Iterationen sind mehr unbewachsene Zellen als Zellen mit weissen Daisies vorhanden. Insgesamt bleibt der Anteil unbewachsener Zellen aber unter demjenigen weisser Daisies, dem er sich beinahe asymptotisch anzunähern scheint.

Die Anzahl weisser Daisies sinkt bald nach Beginn der Modellierung stark ab auf etwa die Hälfte (25%). Der Anteil schwarzer Daisies bricht kurz ein, steigert sich dann kräftig auf bis zu 65%, fällt dann aber wieder auf den Wert von circa 50% zurück, um den er in der Folge oszilliert.

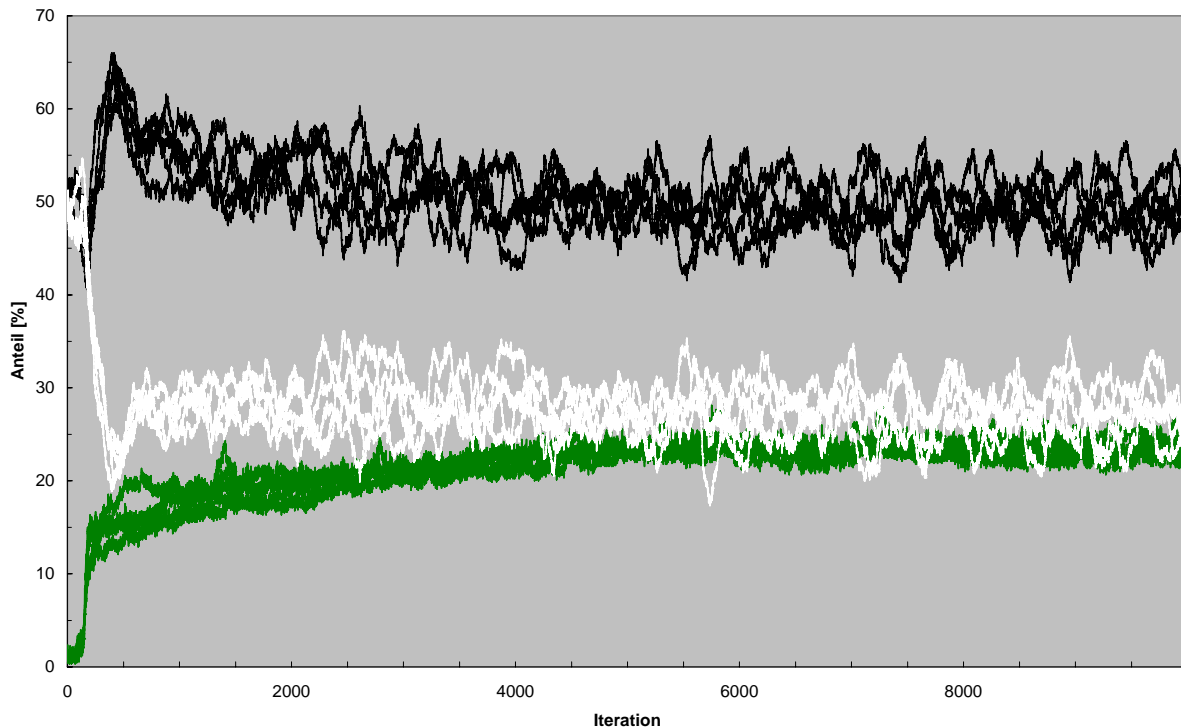


Abb. 16: Verlauf der Anteile der Landnutzungen der Auflösung 10 Meter für 5 Läufe à 10'000 Iterationen

Zum Schluss sind am meisten schwarze Daisies vorhanden (49%), vor weissen Daisies (27%) und unbewachsenen Rasterzellen (23%).

Die Schwankungen in den Anteilen sind kleiner als bei der gröberen Auflösung. Die Anteile weisser und schwarzer Daisies sind dabei deutlich variabler als jener der unbewachsenen Zellen.

### 5 Meter Auflösung

Kurz nach Initialisierung von Daisyworld steigt der Anteil unbewachsener Zellen auch bei 5 Metern Auflösung stark an. Der Anteil unbewachsener Zellen bleibt aber deutlicher als bei 10 Metern Auflösung hinter dem Anteil weisser Daisies zurück.

Die schwarzen und weissen Daisies verhalten sich ähnlich wie in der Auflösung von 10 Metern. Die Anzahl weisser Daisies nimmt kurz nach Beginn stark ab. Auch die Anzahl schwarzer Daisies sinkt zuerst, steigt dann über 50% und sinkt wieder zurück auf etwa 50%. Die Kurven überschreiten aber beide weniger stark als in der nächstgrößeren Auflösung. Insgesamt oszilliert der Anteil unbewachsener Zellen wiederum weniger als jener der schwarzen bzw. weissen Daisies.

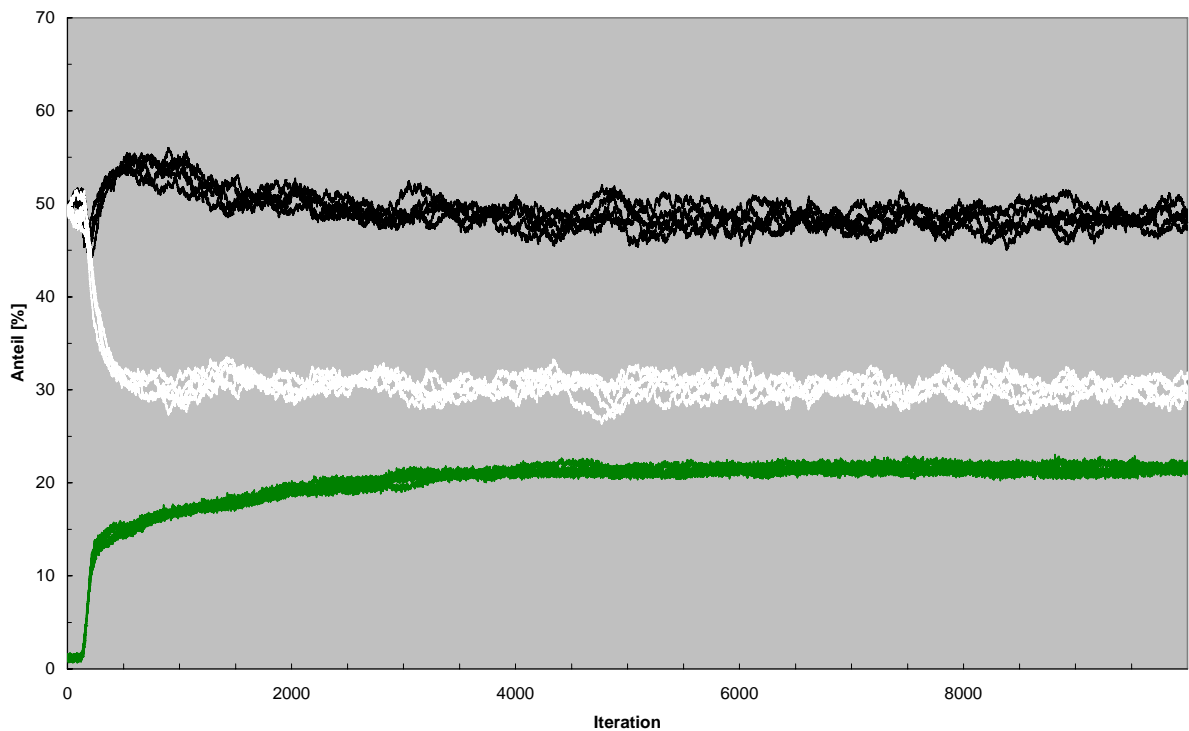


Abb. 17: Verlauf der Anteile der Landnutzungen der Auflösung 5 Meter für 5 Läufe à 10'000 Iterationen

Zum Schluss pendelt der Anteil schwarzer Daisies bei 49%. Weisse Daisies bleiben deutlich dahinter zurück (30%), wie auch der Anteil unbewachsener Zellen (21%).

### 2.5 Meter Auflösung

Wiederum brechen die Anteile weisser und schwarzer Daisies ein, während die Anzahl unbewachsener Zellen rapide ansteigt. Der Anteil weisser Daisies sinkt in circa 500 Iterationen auf etwas über 30%. Der Anteil schwarzer Daisies sinkt schnell auf etwa 45%. Anders als in den größeren Auflösungen erfolgt aber nur noch eine schwache Gegenbewegung. Der Anteil schwarzer Daisies steigt nur noch wenig an, bevor er langsam wieder sinkt und in der Folge auf dem Niveau von circa 45% verharrt.

Auch in der Auflösung von 2.5 Metern variiert der Anteil unbewachsener Zellen am wenigsten. Insgesamt schwingen alle Anteile weniger als in den größeren Auflösungen.

Gegen Ende der Modellierung schwankt der Anteil schwarzer Daisies um 43%, der Anteil weisser Daisies um 32% und derjenige unbewachsener Zellen um 25%.

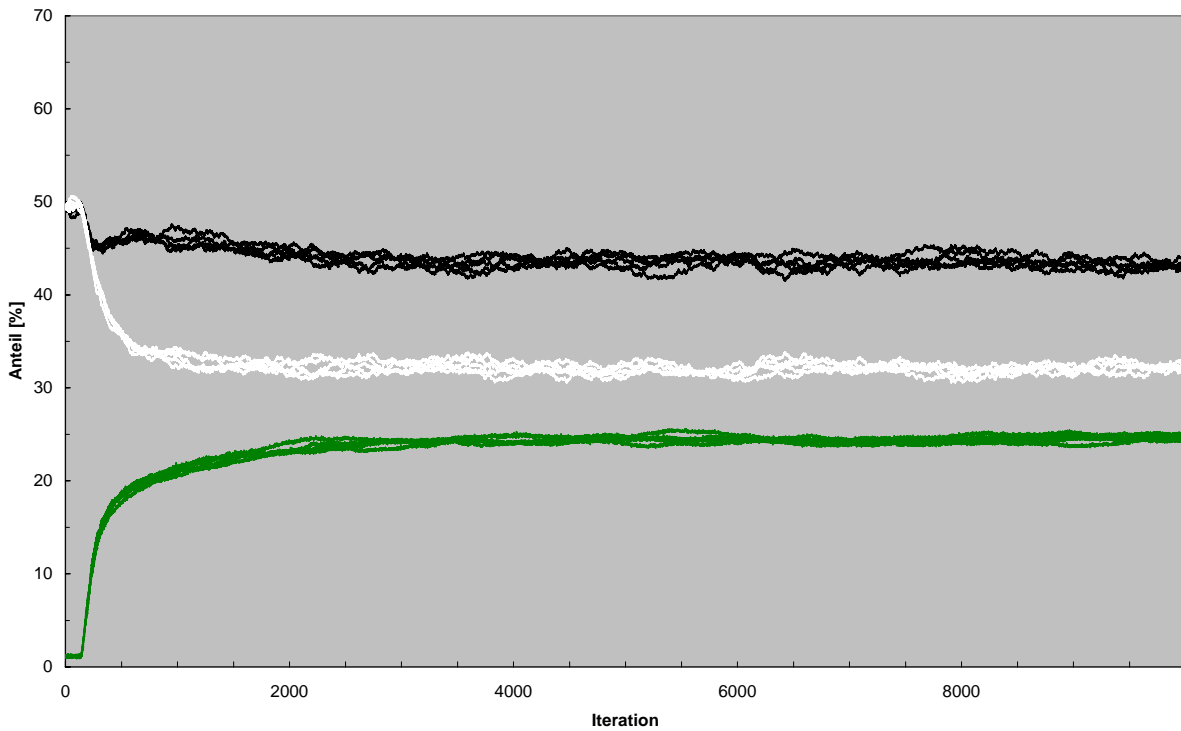


Abb. 18: Verlauf der Anteile der Landnutzungen der Auflösung 2.5 Meter für 5 Läufe à 10'000 Iterationen

### 1 Meter Auflösung

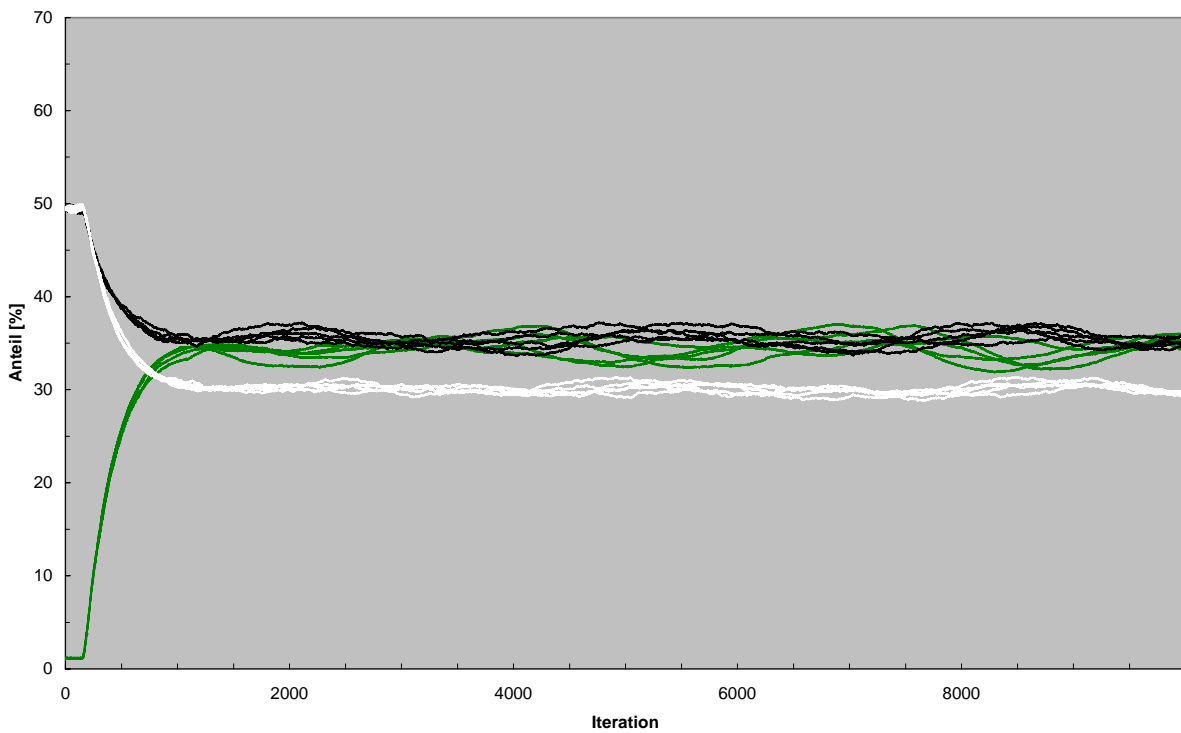


Abb. 19: Verlauf der Anteile der Landnutzungen der Auflösung 1 Meter für 5 Läufe à 10'000 Iterationen

Auch bei der Auflösung von 1 Meter steigt der Anteil unbewachsener Zellen nach der Initialisierung stark an. Zum gleichen Zeitpunkt sinken die Anteile weisser und schwarzer Daisies auf etwa 30% bzw. 35%. Die Anteile weisser und vor allem schwarzer Daisies sinken sehr viel stärker als in der Auflösung von 2.5 Metern. Der Anteil schwarzer Daisies erhöht sich nicht wieder und schwankt um etwa 35%. Der Anteil unbewachsener Zellen steigt sehr viel höher an als in allen anderen Auflösungen. Er oszilliert schliesslich um ebenfalls etwa 35%.

In den letzten 2000 Iterationen beträgt der Anteil weisser Daisies 30%, derjenige schwarzer Daisies 36% und der Anteil unbewachsener Zellen 34%.

### Zusammenfassung

Die Betrachtung der Anteile der Landnutzungen in den einzelnen Modellierungsläufen hat diverse Unterschiede zwischen Modellierungen verschiedener Auflösungsstufen aufgezeigt. Summarisch sind unten die Werte für die Anteile in den jeweils 2000 letzten Iterationen angegeben und auch grafisch dargestellt (vgl. Tabelle 4 und Abbildung 20).

Es ist offensichtlich, dass die Anteile der Landnutzungen in den verschiedenen betrachteten Auflösungen zum Teil sehr stark variieren. Der Anteil schwarzer Daisies und der Anteil unbewachsener Zellen zeigen dabei eine gegengesetzte Entwicklung. In der Auflösung von 1 Meter ist der Anteil schwarzer Daisies mit 36% relativ tief. Er steigt dann mit gröberer Auflösung bis auf 49% (10 Meter) und fällt dann für die Auflösung von 20 Metern wieder auf 36%. Demgegenüber ist der Anteil unbewachsener Zellen in der feinsten Auflösung mit 34% relativ hoch. Er fällt dann bis auf 21% (5 Meter) und steigt wieder über 23% (10 Meter) auf 43% (20 Meter). Der Anteil weisser Daisies ist mit den Anteilen schwarzer Daisies und unbewachsener Zellen bereits bestimmt. Er liegt für 1 bis 5 Meter Auflösung um die 30% und fällt dann auf 27% (10 Meter) und 21% (20 Meter).

Tab. 4: Gemittelter Anteil von Daisies und unbewachsenen Rasterzellen

Auflösung	Anteil Unbewachsen	Anteil Schwarz	Anteil Weiss
1 Meter	34.07%	35.63%	30.30%
2.5 Meter	24.56%	43.34%	32.09%
5 Meter	21.38%	48.50%	30.12%
10 Meter	23.46%	49.25%	27.29%
20 Meter	43.08%	35.76%	21.16%

(berücksichtigt sind jeweils die 2000 letzten Iterationen)

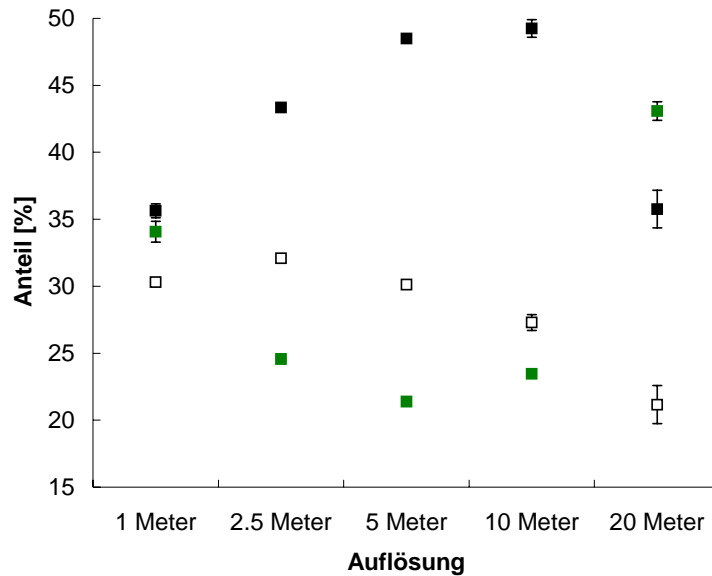


Abb. 20: Mittelwerte und Standardabweichung ( $\pm 1\sigma$ ) der Anteile von Daisies und unbewachsenen Zellen der jeweils 2000 letzten Iterationen

Diese aggregierten Statistiken widerspiegeln das Endresultat von jeweils 10'000 Iterationen von Daisyworld. Wie weiter oben geschildert, zeigen aber auch die zeitlichen Verläufe der Anteile zum Teil grosse Unterschiede.

Insbesondere zu beachten ist die auflösungsabhängig unterschiedlich grosse Volatilität der Anteile der Landnutzungen. Diese ist bei den gröbereren Auflösungen sehr gross und wird im Allgemeinen mit feineren Auflösungen geringer (vielleicht mit Ausnahme von 1 Meter Auflösung). Ein Faktor, der einen Einfluss auf die Volatilität ausübt, ist das Gewicht der einzelnen Rasterzelle an der Gesamtmenge der Rasterzellen in Daisyworld.

Bei den gröbereren Auflösungen bis und mit 5 Metern ist der Verlauf der Anzahl der schwarzen Daisies bemerkenswert. Zu Beginn der Modellierung geht die Anzahl schwarzer Daisies zurück. In den angesprochenen Auflösungen erholt sich die Anzahl schwarzer Daisies aber wieder und steigt auf ein Niveau, das den anfänglichen Anteil von 50% grösstenteils überschreitet. Danach setzt eine Abnahme der schwarzen Daisies ein. Der gleichzeitige Zuwachs an unbewachsenen Zellen, der aber wesentlich langsamer verläuft als der erste sprunghafte Zuwachs zu Beginn der Modellierung, geht im wesentlichen auf Kosten der schwarzen Daisies. In den feineren Auflösungen von 2.5 Metern und 1 Meter ist dieser Ablauf nicht mehr (so deutlich) auszumachen. Zumindest in der Auflösung von 1 Meter ist nach dem ersten Absinken kein systematischer Wiederanstieg der Anzahl schwarzer Daisies auszumachen. Die Anteile oszillieren lediglich leicht.

Neben den beobachteten Unterschieden lassen sich aber auch Gemeinsamkeiten zwischen den untersuchten Auflösungen finden. So verharrt der Anteil unbewachsener Zellen bei allen Auflösungen zuerst auf seinem tiefen Niveau. Nach einigen Dutzend Iterationen schnellert er dann rasch in die Höhe. Dies deutet daraufhin, dass der Prozess der Ausbreitung von unbewachsenen Zellen eine Art von Vorlaufzeit benötigt, bevor er voll zur Wirkung kommt. Eventuell dient dies dazu, eine kritische Anzahl unbewachsener Zellen zu überschreiten. Es ist denkbar, dass die Daisies in dieser Zeit von der für sie sehr angenehmen Initialtemperatur von 24°C zehren. Nach einigen Dutzend Iterationen ist dann mit fortschreitender Temperaturnachführung gemäss der Energiebilanz dieser anfängliche Bonus aufgebraucht und zahlreiche Daisies sterben. Zusätzlich bewirkt die Definition der Überföhrungsfunktion  $\Phi$ , dass sich bei einer grösseren Anzahl von unbewachsenen Zellen die Wahrscheinlichkeit, dass auf einer unbewachsenen Zelle ein neues Daisy wachsen kann, verringert.

### **5.3.2. Hangneigung und potentielle kurzweilige Einstrahlung**

Die Merkmale Hangneigung und potentielle kurzweilige Einstrahlung verhalten sich pro Landnutzungs-kategorie betrachtet ungefähr gegenläufig. Deshalb werden diese beiden Merkmale hier auch zusammen analysiert.

Steigt die durchschnittliche Hangneigung einer Landnutzungs-kategorie, sinkt in der Regel die von ihr potentiell empfangbare kurzweilige Einstrahlung. Der Einstrahlungswinkel und damit die ein-treffende Strahlungsmenge hängen vom lokalen Einstrahlungswinkel der Sonne ab. Dieser wie-derum ist von der Lage der Sonne, der lokalen Hangneigung und der lokalen Exposition ab-hängig. Da das ausgewählte Daisyworld-Gebiet ein relativ steiler Südhang ist, fällt die Exposi-tion als Faktor viel weniger ins Gewicht als die Hangneigung: Generell weisen die meisten Zel-len eine (natürlich unterschiedlich deutliche) Südexposition auf. Vor allem in den feiner aufge-lösten Geländemodellen treten daneben aber auch Fälle auf, wo einzelne Zellen keine Südexposi-tion aufweisen, obwohl sie im Südhang liegen. Der Effekt dieser beschränkten Anzahl von Zel-len erscheint aber in den hier betrachteten Verlaufsstatistiken nicht deutlich – sonst würde sich der Verlauf der kurzweiligen Einstrahlung deutlicher vom Verlauf der durchschnittlichen Hang-neigung pro Landnutzung entkoppeln.

Grundsätzlich muss noch angemerkt werden, dass die ersten hundert Iterationen der Messgrös-sen für unbewachsene Zellen mit Vorsicht betrachtet werden müssen. Wenn in Daisyworld gera-de keine unbewachsene Zelle vorhanden ist, wird für die Hangneigung und die kurzweilige Ein-strahlung in der betreffenden Iteration ein Wert von 0 ausgewiesen. Dies führt zu einem starken Oszillieren der Kurven für unbewachsene Zellen in den ersten hundert Iterationen.



Abgesehen vom unterschiedlich stark ausgeprägten Schwingen der einzelnen Verlaufskurven verhalten sich die durchschnittlichen Hangneigungs- und Einstrahlungswerte in allen untersuchten Auflösungen sehr ähnlich.

Die durchschnittliche Hangneigung der weissen Daisies entfernt sich relativ schnell vom Startwert und sinkt auf etwa  $20^\circ$  bis  $25^\circ$  ab. Die durchschnittliche Hangneigung schwarzer Daisies sinkt langsamer und verharrt mit  $30^\circ$  bis  $35^\circ$  auf einem höheren Wert. Die schwarzen Daisies wachsen also im Durchschnitt an steileren Stellen als die weissen. Ausser in der Auflösung von 20 Metern steigt die durchschnittliche Hangneigung in allen Auflösungen kurz nach Beginn der Modellierung sehr steil auf einen Wert von gegen oder sogar über  $50^\circ$  an. In der Auflösung von 20 Metern erreicht sie immerhin  $45^\circ$ . In allen Auflösungen senkt sich die durchschnittliche Hangneigung der unbewachsenen Zellen in der Folge wieder leicht ab. Sie bleibt mit Werten zwischen  $45^\circ$  und  $50^\circ$  aber immer noch sehr hoch.

Die durchschnittliche kurzwellige Einstrahlung verhält sich wie erwartet in allen Auflösungen praktisch symmetrisch zu den Hangneigungswerten der einzelnen Landnutzungsklassen. Sie steigt für die weissen Daisies stärker an als für die schwarzen Daisies. Beide Daisy-Arten weisen aber eine überdurchschnittliche kurzwellige Einstrahlung auf. Demgegenüber nimmt die kurzwellige Einstrahlung der unbewachsenen Zellen mit dem steilen Anstieg der Hangneigungswerte drastisch ab und pendelt sich auf einem sehr tiefen Niveau ein.

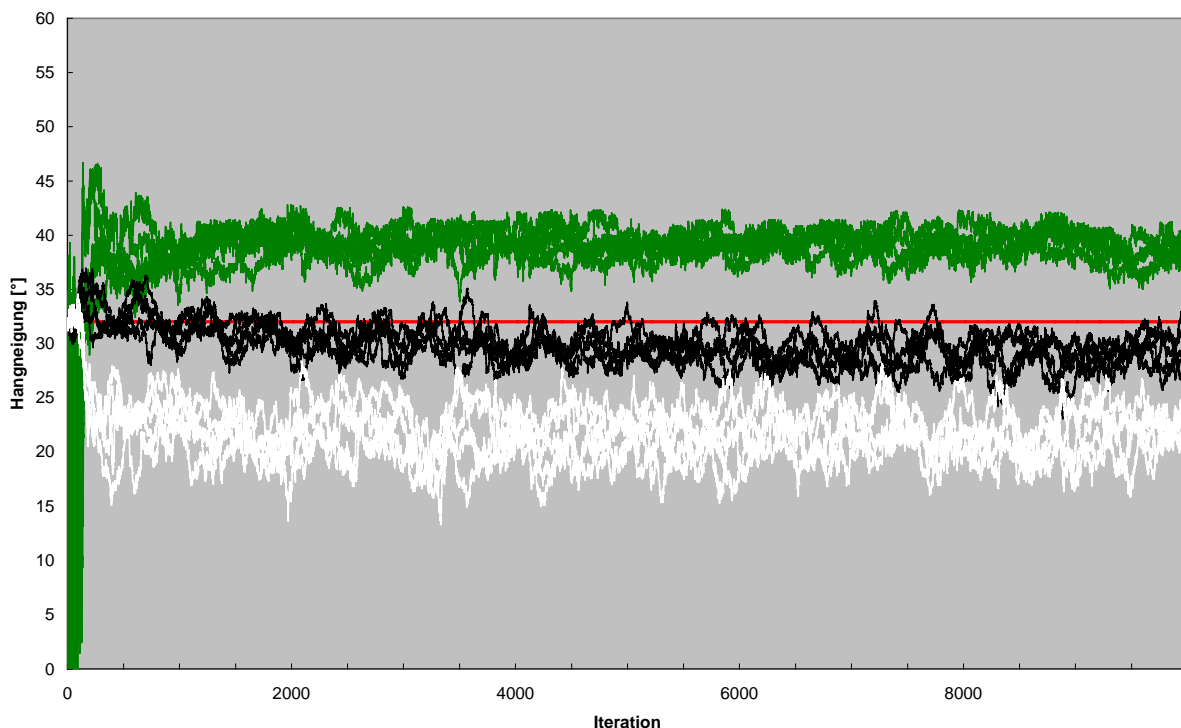


Abb. 21: Verlauf der Hangneigung pro Landnutzung der Auflösung 20 Meter für 5 Läufe à  $10^4$  Iterationen  
(rot: durchschnittliche Hangneigung Daisyworld)

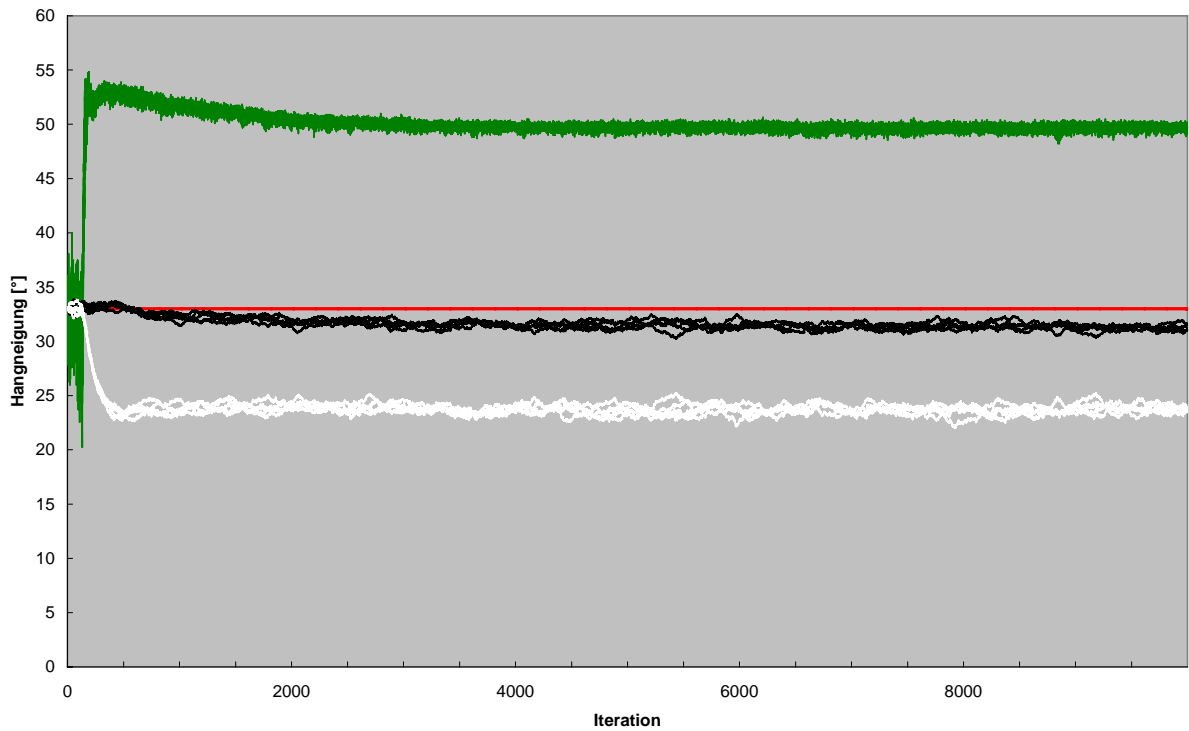


Abb. 22: Verlauf der Hangneigung pro Landnutzung der Auflösung 5 Meter für 5 Läufe à 10'000 Iterationen

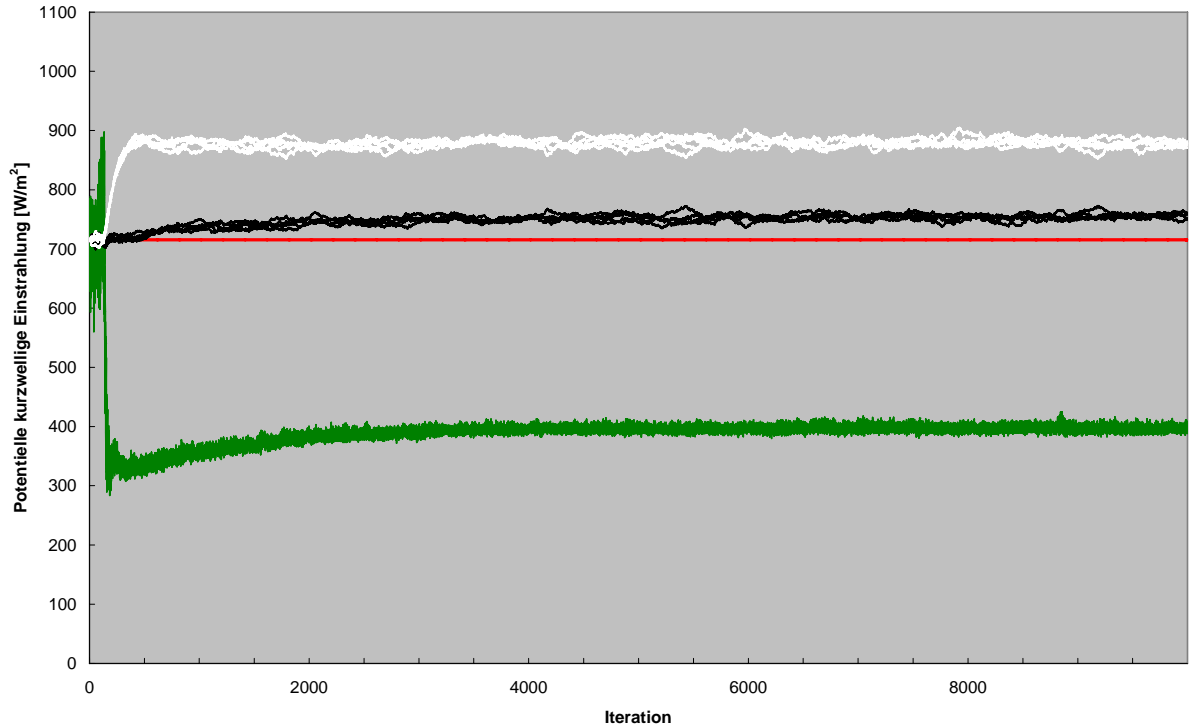


Abb. 23: Verlauf der potentiellen kurzwelligen Einstrahlung pro Landnutzung der Auflösung 5 Meter für 5 Läufe à 10'000 Iterationen

Für den steilen Anstieg der Hangneigungen der unbewachsenen Zellen in den ersten hundert Iterationen lassen sich vor dem Hintergrund der im Abschnitt 5.3.1 untersuchten Verläufe der Anteile der drei Landnutzungen interessante Zusammenhänge aufzeigen. So fällt der Anstieg der durchschnittlichen Hangneigung für unbewachsene Zellen mit der raschen Phase der Ausbreitung unbewachsener Zellen in Daisyworld zusammen. Die Form der Kurve für die Hangneigung legt nahe, dass zuerst sehr steil gelegene Zellen vegetationslos werden. Mit zunehmender Verbreitung unbewachsener Zellen nimmt dann deren durchschnittliche Hangneigung – je nach Auflösung mehr oder weniger stark – wieder ab. Sie bleibt aber für alle Auflösungen über der durchschnittlichen Hangneigung für ganz Daisyworld.

Wie Tabelle 5 und den Abbildungen 24 und 25 entnommen werden kann, folgen auch die Größen Hangneigung und potentielle kurzweilige Einstrahlung nicht einem linearen Trend, wenn sie für unterschiedlich aufgelöste Daisyworld-Modellierungen aufgezeichnet werden.

Die durchschnittliche Hangneigung in Daisyworld sinkt leicht mit gröber werdender Auflösung. Dies entspricht dem Forschungsstand, wonach in gröber aufgelösten DTM steile Hänge eben nicht mehr gleichwertig wie in feiner aufgelösten DTM dargestellt werden können (zum Beispiel Kienzle 2004).

Tab. 5: Durchschnittliche Hangneigung und potentielle kurzweilige Einstrahlung pro Landnutzung und in Daisyworld

Auflösung	Unbewachsen		Schwarz		Weiss		Schwarz-Weiss		Daisyworld	
	Hangn. [°]	Kurzw. Einstr. [W m <sup>-2</sup> ]	Hangn. [°]	Kurzw. Einstr. [W m <sup>-2</sup> ]	Hangn. [°]	Kurzw. Einstr. [W m <sup>-2</sup> ]	Hangn. [°]	Kurzw. Einstr. [W m <sup>-2</sup> ]	Hangn. [°]	Kurzw. Einstr. [W m <sup>-2</sup> ]
1 Meter	47.23	470.17	27.62	826.84	24.91	871.80	2.71	-44.96	33.48	718.96
2.5 Meter	49.37	416.08	30.33	776.58	24.88	866.47	5.45	-89.89	33.26	716.97
5 Meter	49.67	397.30	31.40	753.22	23.68	879.29	7.72	-126.07	33.01	715.44
10 Meter	47.53	426.64	31.42	746.39	21.82	897.49	9.6	-151.1	32.67	714.51
20 Meter	39.01	575.82	29.12	767.57	21.57	871.54	7.55	-103.97	32.17	714.09

(berücksichtigt sind jeweils die 2000 letzten Iterationen)

Einen annähernd linearen Verlauf weist neben der Hangneigung für ganz Daisyworld nur noch jene für weisse Daisies auf. Auch sie sinkt mit gröber werdender Auflösung. Demgegenüber verhalten sich die Hangneigungen für schwarze Daisies und für unbewachsene Zellen nicht linear. Die Hangneigung für schwarze Daisies ist in der Auflösung 1 Meter am tiefsten, steigt dann bis zur Auflösung von 5 Metern an, um nachher wieder zu sinken. Ähnlich verhält sich die durchschnittliche Hangneigung der unbewachsenen Zellen. Anders ist hier nur, dass der Wert für

die Auflösung von 1 Meter nicht das absolute Minimum darstellt, sondern jener für 20 Meter Auflösung.

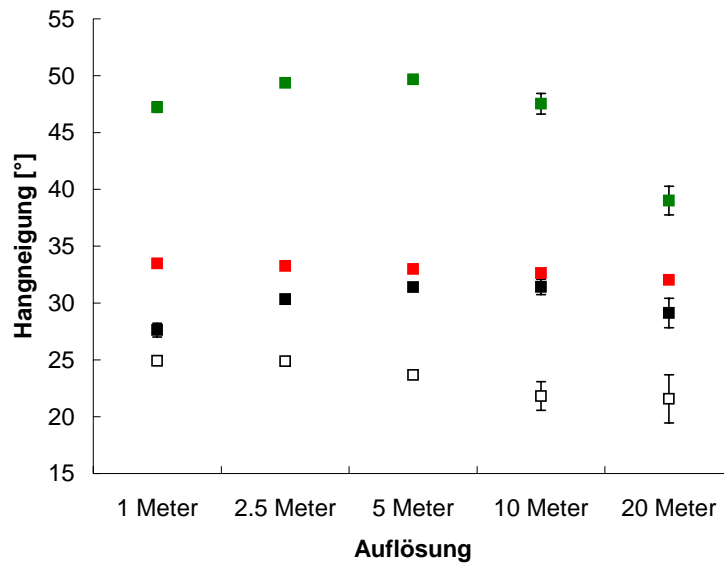


Abb. 24: Mittelwerte und dreifache Standardabweichung ( $\pm 3\sigma$ ) der Hangneigung der jeweils 2000 letzten Iterationen (rot: Daisyworld)

Ähnlich wie bei den weiter oben gezeigten Verlaufskurven einzelner Modellierungsdurchgänge verhalten sich auch die aggregierten Werte der kurzwelligen Strahlung nahezu invers proportional zu den Hangneigungswerten – mit zwei bemerkenswerten Ausnahmen. Die Einstrahlungswerte für weisse Daisies sollten mit Blick auf die zugehörigen Hangneigungswerte mit gröber werdender Auflösung linear steigen. Dies ist aber nicht der Fall. Die Einstrahlung für 1 Meter Auflösung ist höher als jene für 2.5 Meter Auflösung. Und auch die Einstrahlung für 10 Meter Auflösung ist höher als jene für 20 Meter Auflösung (vgl. Abbildung 25).

Zweitens ist bemerkenswert, dass die Einstrahlungsmenge für Daisyworld mit gröberer Auflösung – wenn auch wenig – kleiner wird; dies bei kleiner werdenden durchschnittlichen Hangneigungswerten.

Für beide genannten scheinbar paradoxen Erscheinungen kann im Rahmen dieser Untersuchung keine abschliessende Erklärung geliefert werden. Es ist sicherlich darauf hinzuweisen, dass geringere Hangneigung nicht unbedingt höhere Einstrahlung bedeuten muss. Daisyworld liegt in dieser Untersuchung an einem relativen steilen Südhang, der flach ausläuft. Die Sonne steht aber nicht senkrecht über dem Gebiet. Wäre dies der Fall, wäre der Zusammenhang zwischen geringer Hangneigung und hoher Einstrahlung klar gegeben. Die verwendete Daisyworld-Implementation betrachtet den Sonnenstand vom nordhemisphärischen Sommer auf  $46.65^\circ$  nördlicher Breite um 12 Uhr mittags. In dieser Konstellation erhalten die geringsten Hangneigungen

nicht die grössten Einstrahlungsmengen. Vielmehr muss die maximale Einstrahlung in Gebieten mit gemässiger Neigung nach Süden erwartet werden. Es ist denkbar, dass dieser Umstand zu den oben beschriebenen scheinbaren Paradoxien geführt hat.

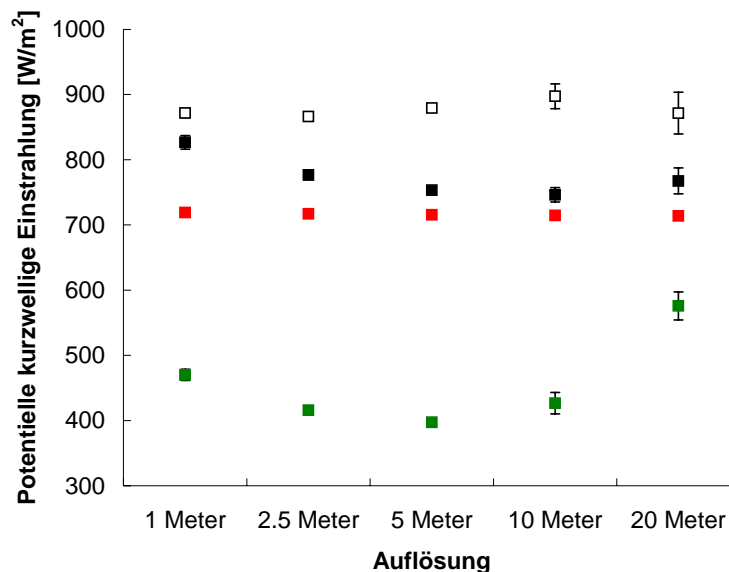


Abb. 25: Mittelwerte und dreifache Standardabweichung ( $\pm 3\sigma$ ) der potentiellen kurzwelligen Einstrahlung der jeweils 2000 letzten Iterationen ( rot: Daisyworld)

Interessant sind schliesslich noch die Differenz zwischen der Hangneigung für schwarze Daisies und jener für weisse Daisies sowie die Differenz zwischen den entsprechenden Einstrahlungsmengen (vgl. Abbildung 26). Bis auf die Auflösung 20 Meter verhalten sich beide Differenzen linear. Sowohl die Differenz der Hangneigungen als auch die Differenz der Einstrahlungsmengen der beiden Landnutzungen wird absolut betrachtet für gröbere Auflösungen grösser. Einzig für die Auflösung von 20 Metern werden beide Trends gebrochen. Auf mögliche Gründe für diesen Umstand wird noch im Abschnitt 5.5 eingegangen. Beide linearen Trends zeigen, dass die ökologischen Nischen der beiden Daisy-Spezies sich mit gröber werdender Auflösung stärker separieren, d.h. die Daisies scheinen sich in der gröber aufgelösten Daisyworld spezialisierter zu verhalten.

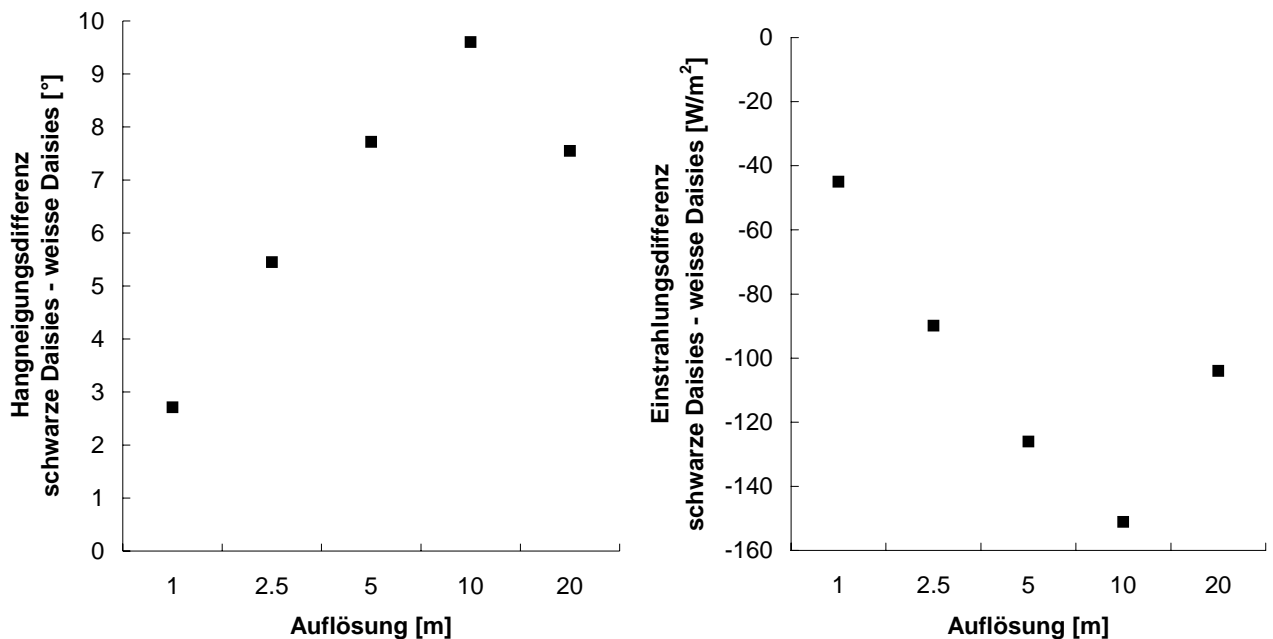


Abb. 26: Einstrahlungs- und Hangneigungsdifferenz schwarzer und weisser Daisies

### 5.3.3. Temperatur

Die Temperatur der einzelnen Landnutzungsarten in Daisyworld hängt wie in Abschnitt 4.3 beschrieben von der Menge kurzweiliger Einstrahlung gemäss Hangneigung und Exposition, der lokalen Albedo, der diffundierten Wärmemenge und von der langwelligen Abstrahlung (die selbst wieder temperaturabhängig ist) ab.

#### 20 Meter Auflösung

Obwohl sich die weissen Daisies – wie in Abschnitt 5.3.2 gesehen – an Orten ansiedeln, die durchschnittlich eine höhere Strahlungsleistung empfangen, verbleibt ihre Temperatur durchwegs unter jener der schwarzen Daisies. Dies ist auf die hohe Albedo der weissen Daisies zurückzuführen. Sie sorgt dafür, dass 95% der eintreffenden Strahlung reflektiert werden. Der zusätzliche fokale Einfluss der Wärmediffusion wirkt ausgleichend auf die Temperatur. Es darf also angenommen werden, dass die Temperatur der weissen Daisies ohne diesen Ausgleichmechanismus noch tiefer läge.

Sehr tief (bis circa  $-10^{\circ}\text{C}$ ) ist die Temperatur der unbewachsenen Zellen. Dies ist wohl primär darauf zurückzuführen, dass unbewachsene Zellen an durchschnittlich sehr steilen Stellen auftreten, wo die Einstrahlung und damit die auch durch hohe Albedo erreichbare Umgebungstemperatur einfach zu tief ist für das Wachstum von Daisies. Zudem treten die unbewachsenen Zellen wie in Abschnitt 5.2 gesehen räumlich geclustert auf. Diese Gruppen unbewachsener Zellen kön-

nen über die Wärmediffusion nur an ihren Rändern Energie von allenfalls da angesiedelten, wärmeren schwarzen Daisies beziehen.

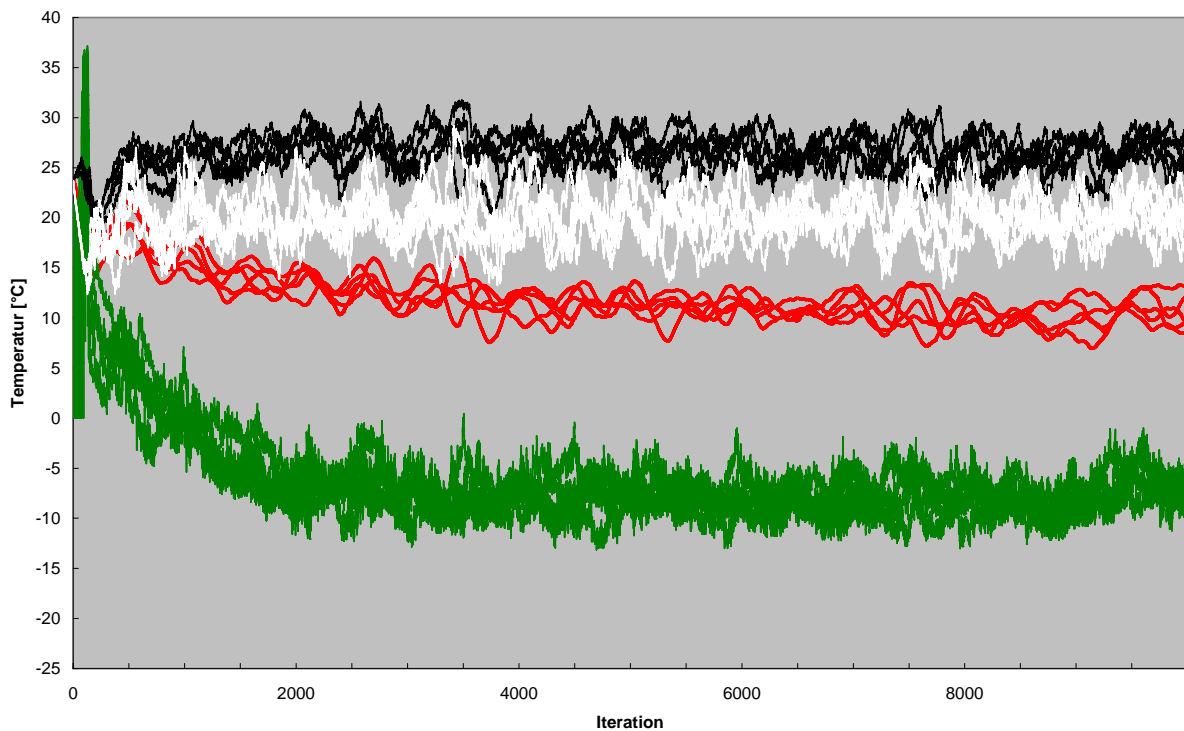


Abb. 27: Verlauf der Temperatur pro Landnutzung der Auflösung 20 Meter für 5 Läufe à 10'000 Iterationen  
(rot: Durchschnittstemperatur Daisyworld)

### 10 Meter Auflösung

Bei 10 Metern Auflösung liegt die Temperatur für weisse Daisies (18°C) deutlich tiefer als in der nächstgrößeren Auflösung (20°C). Die Temperatur für schwarze Daisies bleibt demgegenüber bei etwa 26°C. Auffallend ist, wie tief die Temperatur für unbewachsene Zellen (-20°C: 20 Meter Auflösung: -8°C) abfällt. Der Grund für diese Differenzen wird im Abschnitt 5.4 anlässlich der räumlichen Betrachtung der Modellierungsergebnisse aufgezeigt.

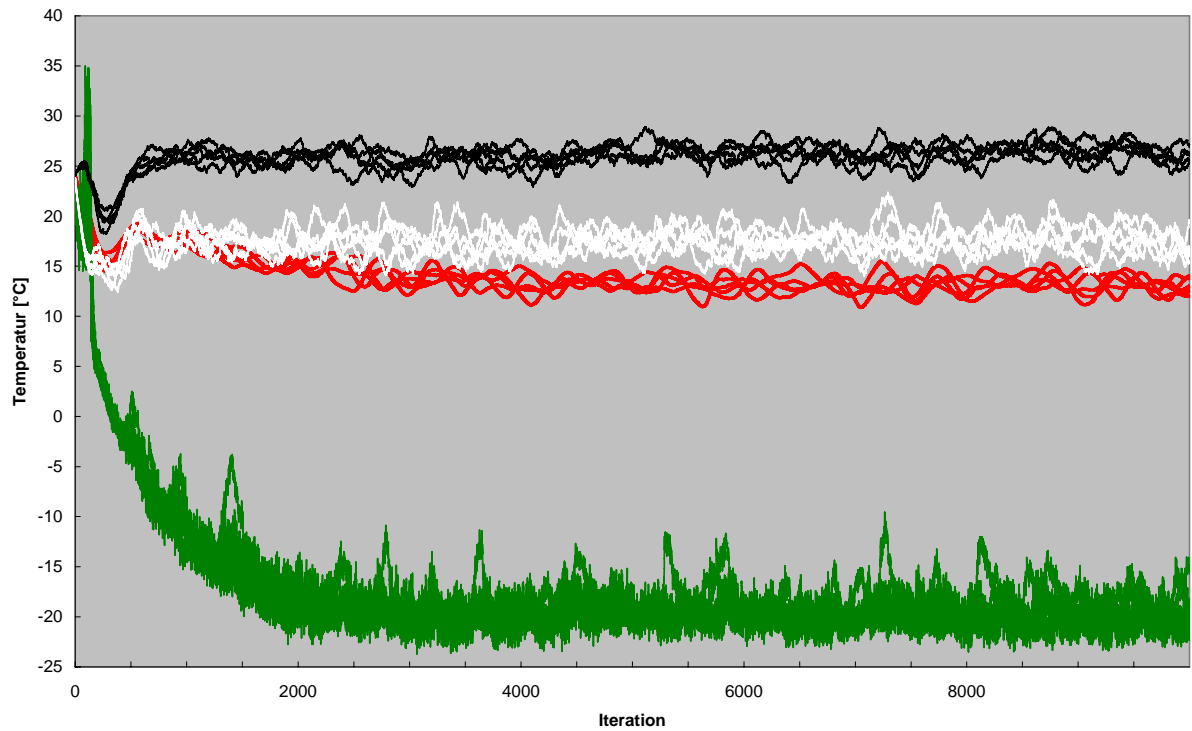


Abb. 28: Verlauf der Temperatur pro Landnutzung der Auflösung 10 Meter für 5 Läufe à 10'000 Iterationen

### 5 Meter Auflösung

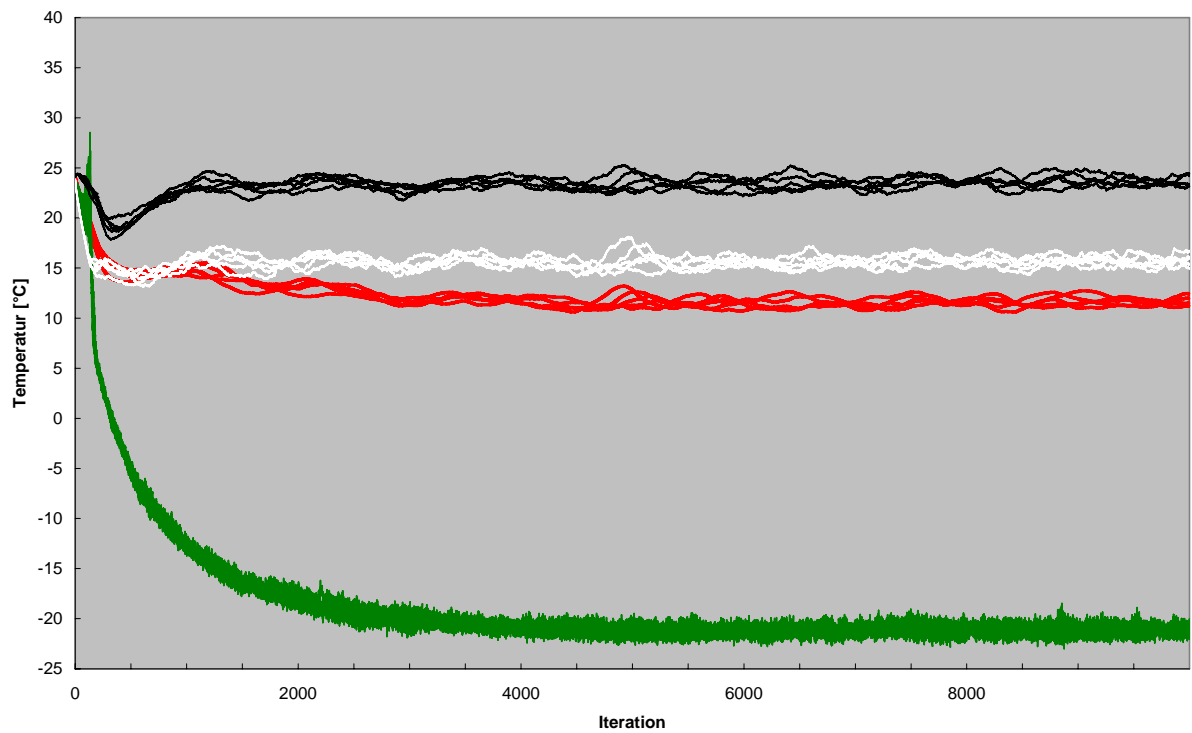


Abb. 29: Verlauf der Temperatur pro Landnutzung der Auflösung 5 Meter für 5 Läufe à 10'000 Iterationen



Bei der Auflösung von 5 Metern liegen die Temperaturen für schwarze ( $24^{\circ}\text{C}$ ) und weisse Daisies ( $16^{\circ}\text{C}$ ) beide etwas tiefer als in der Auflösung von 10 Metern (vgl. Abbildung 29). Gleiches gilt für die Durchschnittstemperatur mit etwa  $12^{\circ}\text{C}$ . Die Temperatur für unbewachsene Zellen sinkt gegenüber der nächstgrößeren Auflösung nochmals leicht ab.

### 2.5 Meter Auflösung

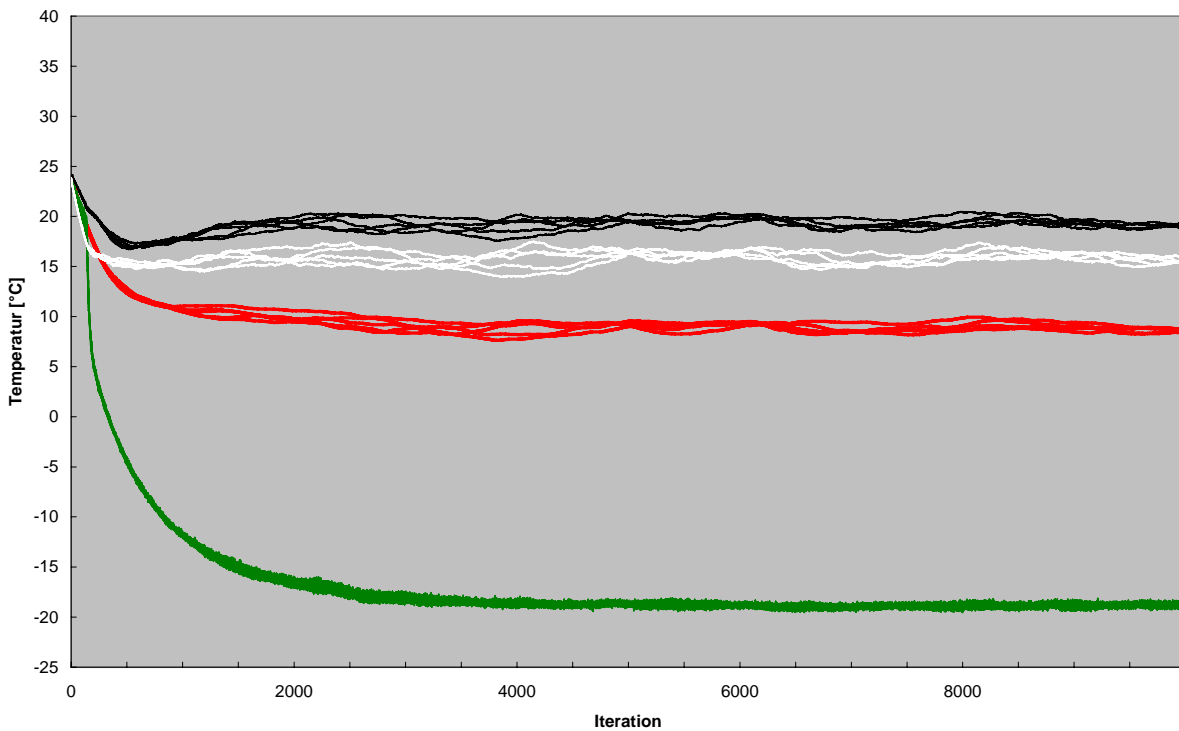


Abb. 30: Verlauf der Temperatur pro Landnutzung der Auflösung 2.5 Meter für 5 Läufe à 10'000 Iterationen

Die Temperaturen für weisse ( $16^{\circ}\text{C}$ ) und schwarze Daisies ( $19^{\circ}\text{C}$ ) liegen gegenüber allen gröber aufgelösten Modellierungen näher zusammen. Die Durchschnittstemperatur ( $9^{\circ}\text{C}$ ) ist wieder gesunken. Die Temperatur der unbewachsenen Zellen ist auch für die Auflösung von 2.5 Metern mit  $-19^{\circ}\text{C}$  ziemlich tief.

### 1 Meter Auflösung

Bei der Auflösung von 1 Meter kann etwas Spezielles beobachtet werden. Die Temperatur der weissen Daisies liegt mit  $17.75^{\circ}\text{C}$  leicht über jener der schwarzen Daisies ( $17.23^{\circ}\text{C}$ ). Dies ist eine Umkehrung der Verhältnisse bei sämtlichen gröber aufgelösten Modellierungen. Die Einstrahlung auf die weissen Daisies kann dafür nicht alleine verantwortlich sein. Wie in Abschnitt 5.3.2 gesehen, ist diese zwar in der Auflösung von 1 Meter ( $872 \text{ W/m}^2$ ) grösser als für 2.5 Meter ( $866 \text{ W/m}^2$ ), jedoch kleiner als zum Beispiel in der Auflösung von 5 Meter ( $879 \text{ W/m}^2$ ). Hinge-

gen ist die Einstrahlung für schwarze Daisies in der feinsten Auflösung aussergewöhnlich hoch:  $827 \text{ W/m}^2$  (2.5 Meter:  $777 \text{ W/m}^2$ ; 5 Meter:  $753 \text{ W/m}^2$ ).

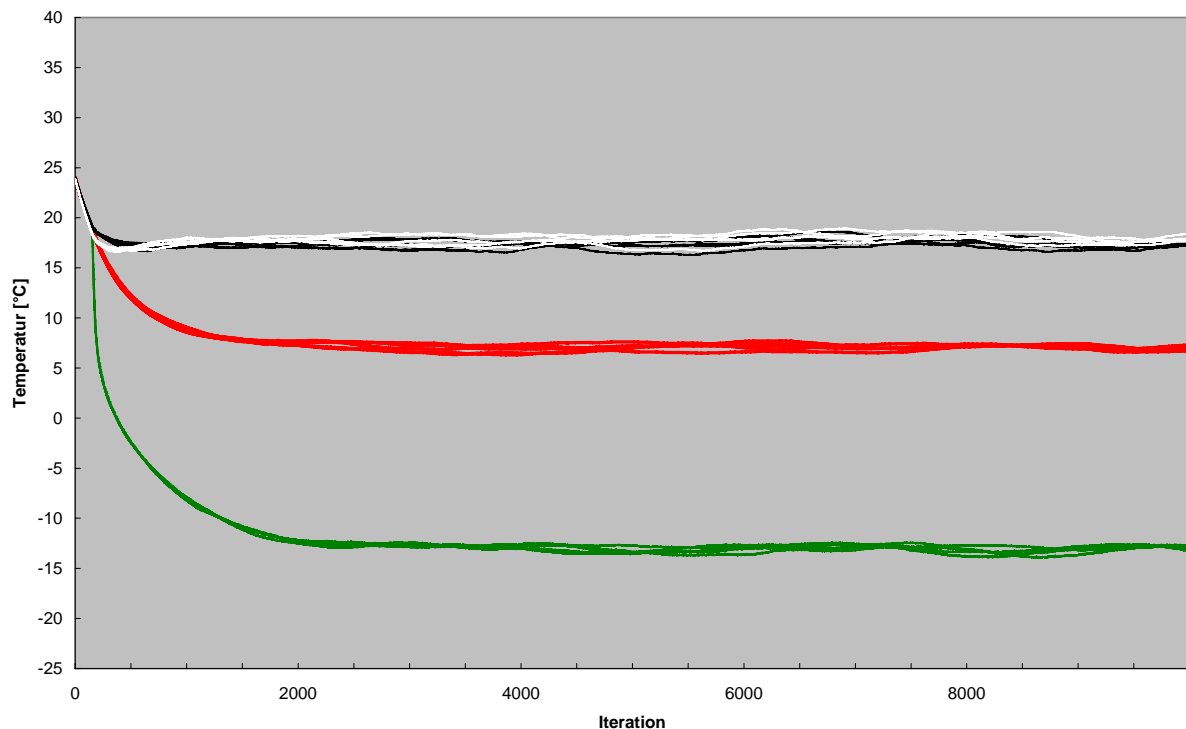


Abb. 31: Verlauf der Temperatur pro Landnutzung der Auflösung 1 Meter für 5 Läufe à 10'000 Iterationen

Trägt eventuell diese hohe Einstrahlung bei den schwarzen Daisies verbunden mit deren hoher Albedo (über die Wärmediffusion) zu einer zusätzlichen Erwärmung auch der weissen Daisies bei? Voraussetzung für diesen Einflussfaktor wäre eine recht gut durchmischte räumliche Verteilung der weissen und schwarzen Daisies. Anhaltspunkte zu dieser Hypothese gibt wiederum die räumliche Betrachtung der Resultate in Abschnitt 5.4. Unklar bleibt trotzdem, wie sich die weissen Daisies stärker als die schwarzen Daisies erwärmen können. Dies kann alleine mit Wärmediffusion nicht schlüssig erklärt werden, würden doch die Gesetze der Thermodynamik verletzt, würde ein Körper durch Abkühlung seiner selbst einen bereits wärmeren Körper noch weiter erwärmen.

### Zusammenfassung

Tabelle 6 und Abbildung 32 enthalten die Temperaturverhältnisse in Daisyworld in den letzten 2000 Iterationen. In bezug auf die Auflösung von 20 Metern sind zwei Umstände auffällig. Die weissen Daisies und noch stärker die unbewachsenen Zellen weisen beide eine höhere Durchschnittstemperatur auf als in allen anderen Auflösungen. Diese beiden Phänomene sind die direk-

te Folge einer neuen Art von unbewachsenem Gebiet, die nur in der größten Auflösung auftritt. Wie in Abschnitt 5.4 deutlich werden wird, existiert in der größten Auflösung eine Hitzeinsel, während sonst die unbewachsenen Gebiete durch Kälteinseln in Daisyworld entstehen. Diese Hitzeinsel ist für die angeführten Temperatureffekte verantwortlich.

Tab. 6: Temperatur pro Landnutzung und in Daisyworld

Auflösung	Unbewachsen	Schwarz	Weiss	Schwarz-Weiss	Daisyworld
1 Meter	-13.12 °C	17.23 °C	17.75 °C	-0.52 °C	7.05 °C
2.5 Meter	-18.77 °C	19.26 °C	15.88 °C	3.38 °C	8.83 °C
5 Meter	-21.28 °C	23.54 °C	15.61 °C	7.93 °C	11.57 °C
10 Meter	-19.50 °C	26.40 °C	17.57 °C	8.83 °C	13.25 °C
20 Meter	-7.72 °C	26.46 °C	19.96 °C	6.5 °C	10.51 °C

(berücksichtigt sind jeweils die 2000 letzten Iterationen)

Weiter ist in der Auflösung von 1 Meter das Temperaturverhältnis zwischen weissen und schwarzen Daisies invertiert (vgl. auch Abbildung 33). Die Differenz beträgt zwar nur -0.52 °C ist aber mit Blick auf die Strahlungsverhältnisse doch sehr bemerkenswert. Möglichen Ursachen für diesen Umstand wird im nächsten Abschnitt nachgegangen.

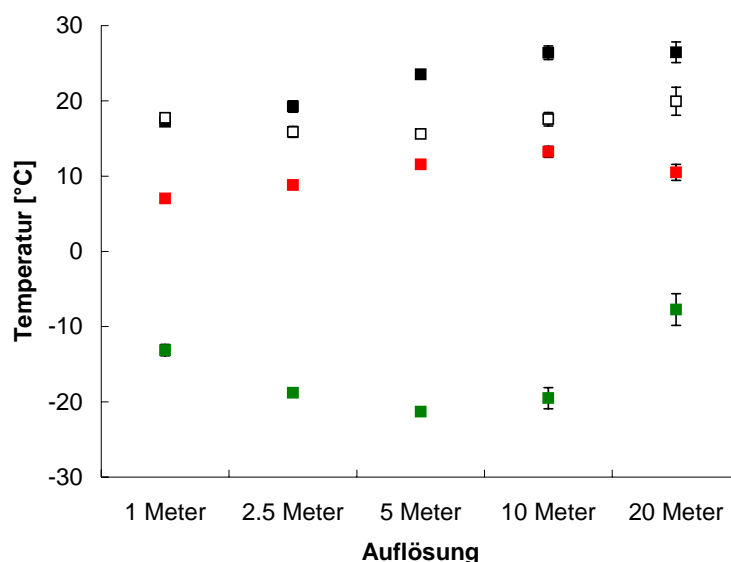


Abb. 32: Mittelwerte und dreifache Standardabweichung (+/- 3 $\sigma$ ) der Temperatur der jeweils 2000 letzten Iterationen (rot: Daisyworld)

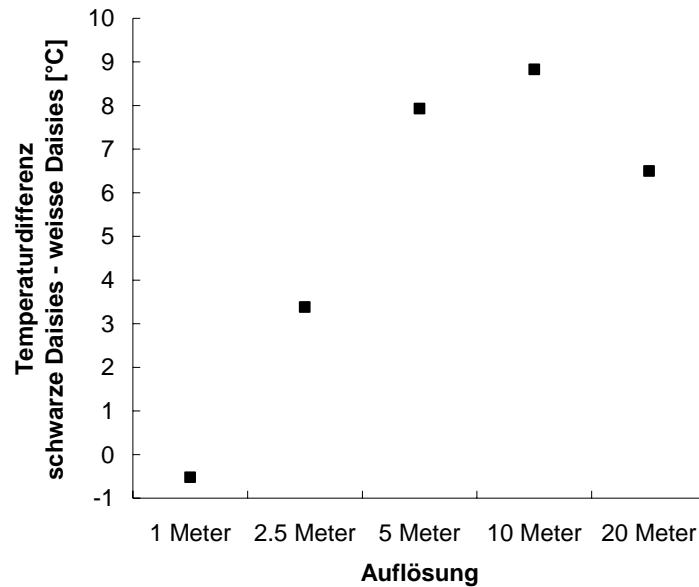


Abb. 33: Differenz der Temperatur schwarzer und weisser Daisies

## 5.4. Räumliche Betrachtung der Modellierungsergebnisse

Die räumliche Betrachtung der Daisyworld-Ergebnisse geschieht anhand der in Abschnitt 4.4 und zu Beginn von Abschnitt 5 eingeführten Zählraster und den aus ihnen abgeleiteten Dominanzrastern.

Die Dominanzraster treffen Aussagen über die ökologischen Eigenschaften an einem Ort und wie diese von den beiden Spezies genutzt bzw. nicht genutzt werden (im Fall von „unbewachsen“). Eine klare Dominanz von weissen Daisies an einem Ort ist ein Hinweis darauf, dass diese Spezies an diesem Ort durch die Umweltbedingungen (genau genommen durch ihre Rückwirkung auf die Umweltbedingungen) favorisiert ist. Sie verbessert mit ihrer Fähigkeit, die Reflexion von kurzwelliger Strahlung und damit die Temperatur zu beeinflussen, die (allenfalls schlechten) Standortbedingungen tendenziell für sich.

### 1 Meter Auflösung

Qualitativ betrachtet sehen die Dominanzraster für die feinste Auflösung von 1 Meter sehr ähnlich aus. Es gibt jeweils drei grössere Inseln, auf denen keine Daisies existieren können. Daneben gibt es in den einzelnen Läufen eine unterschiedliche Anzahl von kleineren vegetationslosen Gebieten.

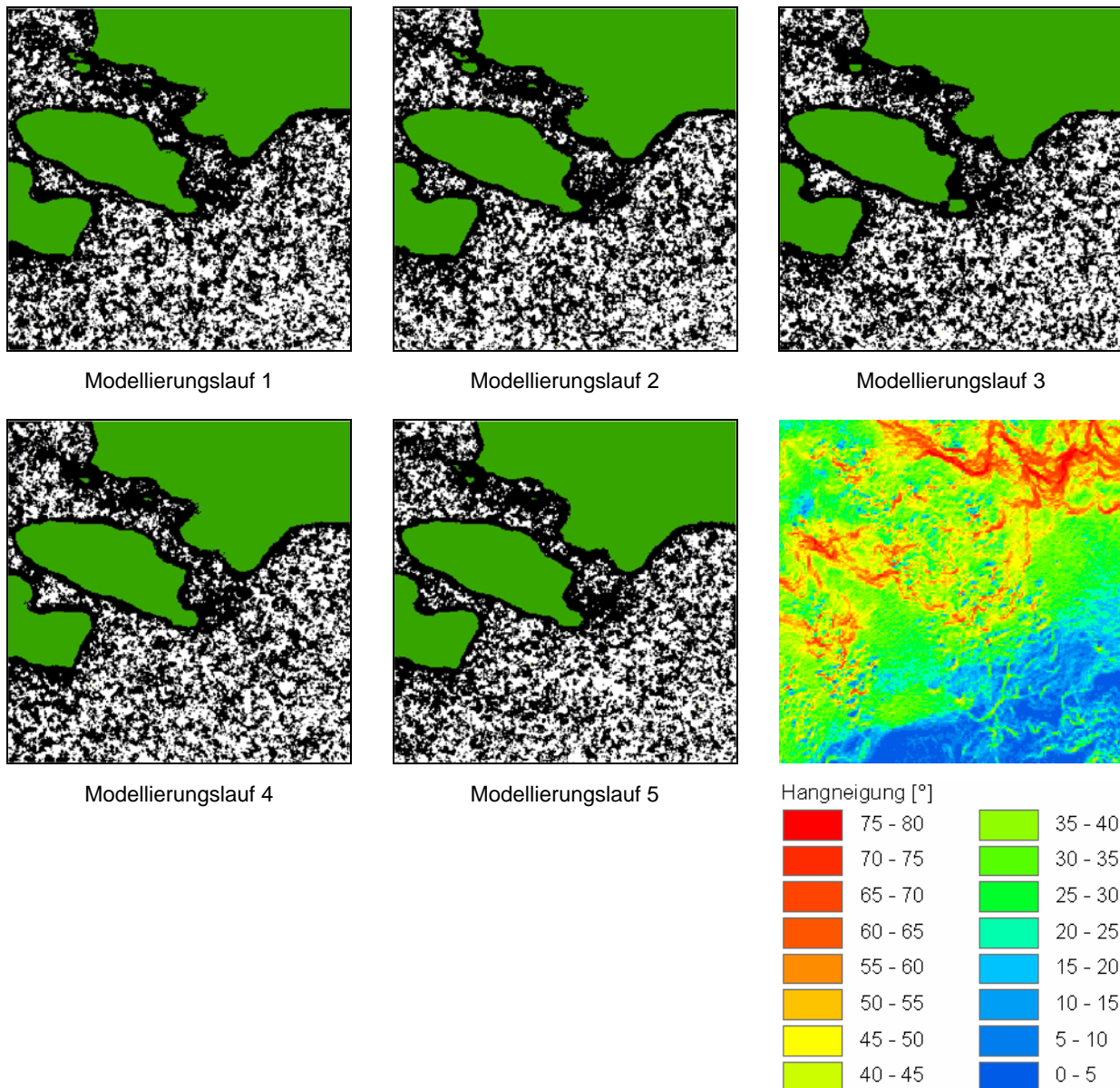


Abb. 34: Dominanzraster und Hangneigung der Auflösung 1 Meter

Die von Daisies bewachsene Fläche erscheint relativ heterogen. Die schwarze und weisse Spezies sind weitgehend durchmischt. Die Verteilung der beiden Arten ist aber nicht völlig isotrop. Es gibt kleinräumige Ansammlungen; Clusters, in denen sich weisse bzw. schwarze Daisies konzentrieren. Sie sind aber sehr fein untergliedert, so dass die Verteilung der Pflanzen insgesamt doch relativ ebenmässig erscheint. Zweifellos funktioniert der Energietransfer von den schwarzen zu den weissen Daisies in dieser Auflösung dank der guten Durchmischung der beiden Arten sehr direkt. Dies erklärt, wieso die Temperaturen der beiden Landnutzungen in dieser Auflösung sehr ähnlich sind.

Speziell ist die Ansammlung von schwarzen Daisies an den Grenzen zu den unbewachsenen Gebieten. Sie bilden einen Saum um diese. Dieser Saum ist einige Rasterzellen (also einige Meter) mächtig und wird kaum je von einem weissen Daisy durchbrochen. Alleine an diesem Saum

lässt sich schon erkennen, dass die drei grossen vegetationslosen Gebiete in Daisyworld Kälteinseln sind. In diesen Gebieten ist es wegen geringer Einstrahlung zu kalt, als dass Daisies längerfristig überleben könnten. Diese Aussage lässt sich anhand der Temperaturraster, die Daisyworld während der Modellierung ausgibt, bestätigen.

### 2.5 Meter Auflösung

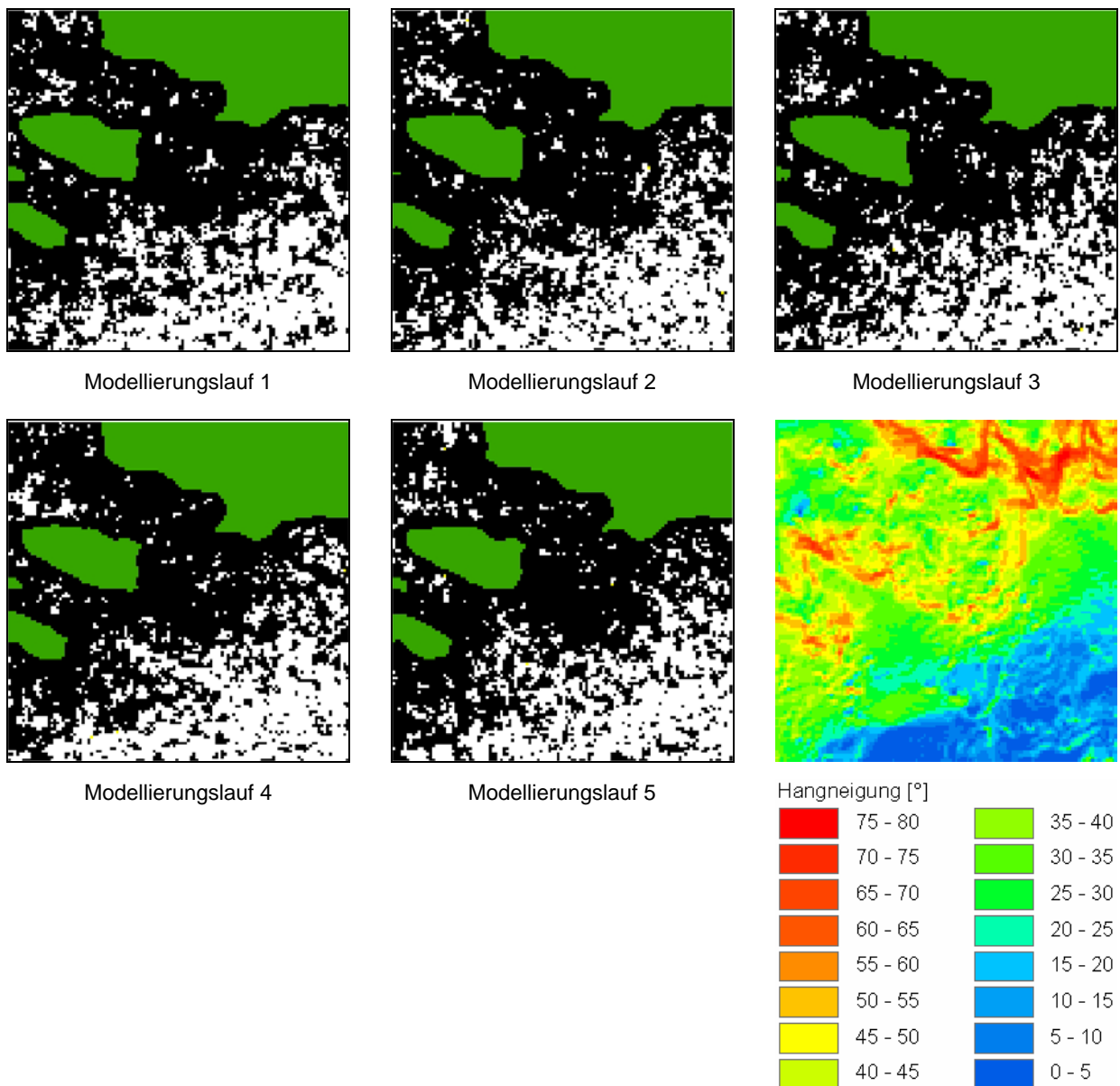


Abb. 35: Dominanzraster und Hangneigung der Auflösung 2.5 Meter

Auch die Dominanzraster für die Auflösung von 2.5 Metern sehen sich untereinander ziemlich ähnlich. Auch hier gibt es jeweils drei grössere Inseln, auf denen keine Daisies existieren. Daneben tauchen wiederum vereinzelt kleinere vegetationslose Gebiete auf.

Im Vergleich zu den Dominanzrastern der Auflösung 1 Meter erscheint die bewachsene Fläche weniger heterogen. Die schwarze und weiße Daisy-Art treten zwar immer noch stellenweise durchmischt auf; insgesamt kann aber eine Tendenz zur Entmischung ausgemacht werden. Die weiße Art dominiert im südlichen Teil von Daisyworld, während die schwarze Art im nördlichen Teil überwiegt.

Wiederum erscheint ein Saum schwarzer Daisies um die unbewachsenen Gebiete in Daisyworld. Er ist etwas mächtiger als in der feineren Auflösung, wird aber wegen der tendentiellen Entmischung der verschiedenfarbenen Daisies weniger gut wahrgenommen.

### 5 Meter Auflösung

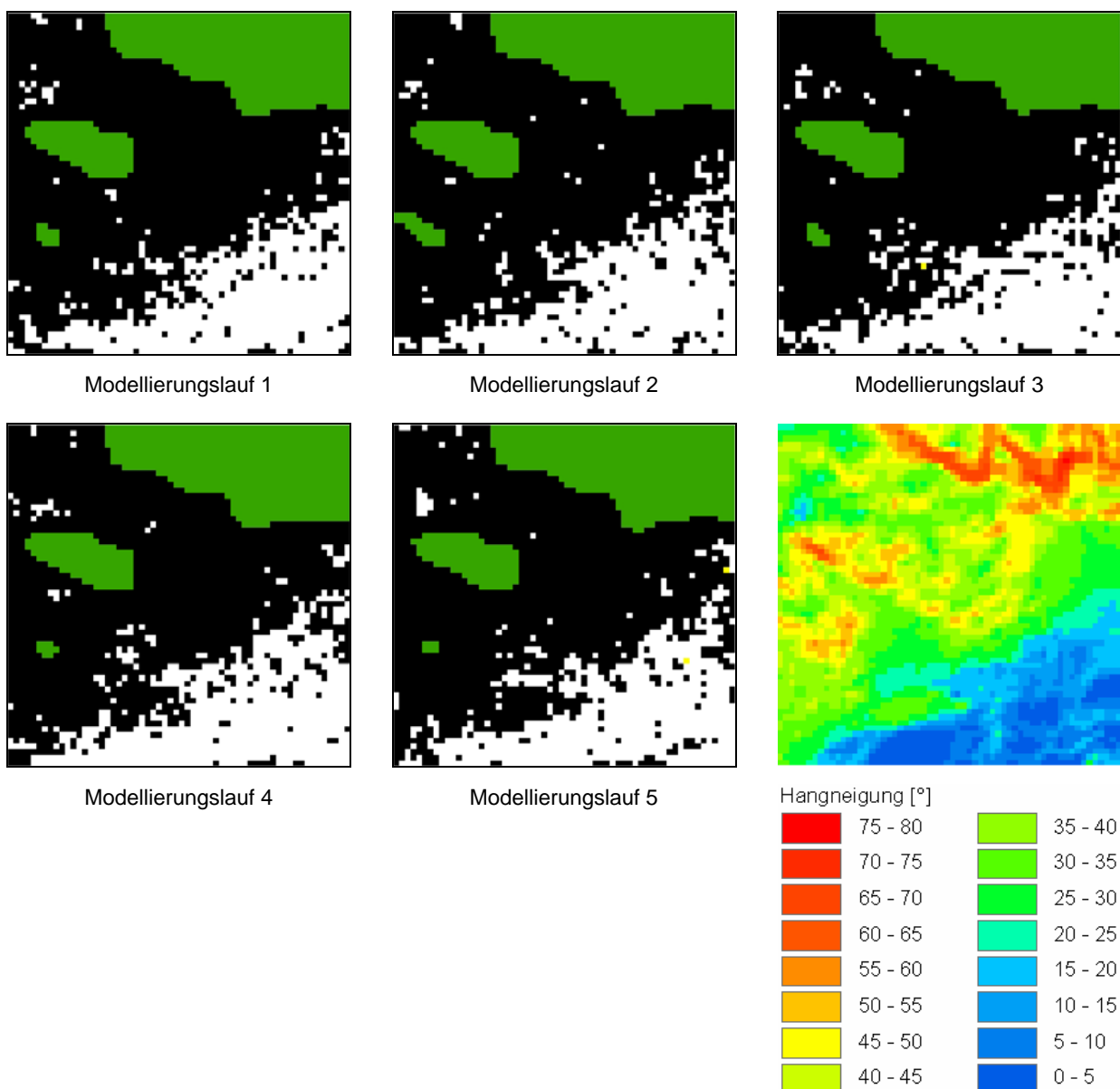


Abb. 36: Dominanzraster und Hangneigung der Auflösung 5 Meter

In der Auflösung von 5 Metern erscheint die Varianz zwischen den Dominanzraster relativ klein. Es existieren zwei grössere Gebiete ohne Daisies. Es fällt auf, dass gegenüber den feineren Auflösungen das kleinste, am weitesten südlich gelegene vegetationslose Gebiet an Grösse eingebüsst hat.

Die bei der Auflösung von 2.5 Metern erstmals festgestellte Tendenz zur farblichen Entmischung in Daisyworld tritt in der Auflösung von 5 Metern noch deutlicher zutage. Die weissen Daisies wachsen vornehmlich im Süden, die schwarzen vor allem im nördlichen Teil von Daisyworld. Die Gebiete der einzelnen Farben sind ziemlich homogen und werden nur noch an wenigen Stellen von der jeweils anderen Farbe durchbrochen. Zwischen den beiden klar dominierten Gebieten gibt es eine Art Übergangszone, in der weisse und schwarze Daisies zusammen auftreten.

### **10 Meter Auflösung**

In der Auflösung von 10 Metern tauchen in den meisten Modellierungsläufen noch zwei grössere Inseln ohne Daisies auf. In den Läufen 1 und 3 bricht die Pflanzendecke an einer dritten Stelle (die mit der Lage der dritten vegetationslosen Insel in allen feineren Auflösungen identisch ist) ebenfalls auf.

Die Entmischung der schwarzen und weissen Daisies ist in dieser Auflösung annähernd vollständig. Nur noch wenige, kleine Enklaven von weissen Daisies wachsen im von schwarz dominierten Norden, und praktisch nur noch einzelne schwarze Daisies im weissen Süden.



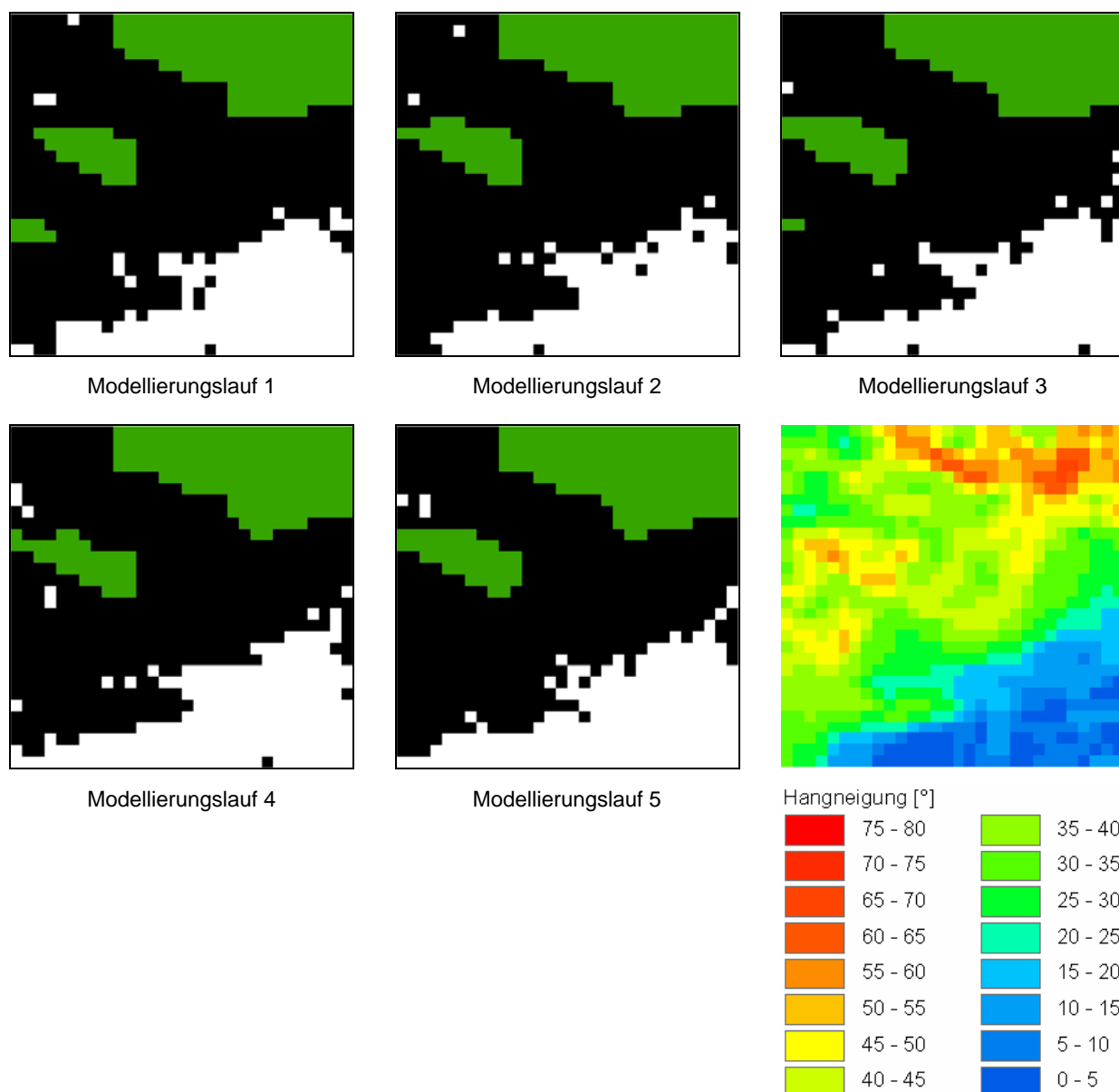


Abb. 37: Dominanzraster und Hangneigung der Auflösung 10 Meter

### 20 Meter Auflösung

In den Modellierungsläufen mit 20 Metern Auflösung sind die vegetationslosen Gebiete meist wieder deutlich grösser und sicher zahlreicher als in den feineren Auflösungen. Insbesondere in der südöstlichen Ecke von Daisyworld entsteht ein neues Gebiet ohne Daisies. Während die anderen Gebiete nach wie vor Kälteinseln darstellen, ist das letztere – wie der Saum weisser Daisies schon erahnen lässt – eine Hitzeinsel. Es ist in diesem Gebiet im Unterschied zu allen anderen Auflösungen in der Modellierung mit 20 Metern Auflösung zu warm, als dass Daisies sich dauerhaft festsetzen könnten. Dies ist ein augenfälliger Unterschied zu den Modellierungen feinerer Auflösungen und der Grund für einige deutliche Abweichungen in den aggregierten Statistiken dieser Auflösung. Diese Hitzeinsel verändert denn auch massgeblich die Temperaturstati-

stik. Wie in Abschnitt 5.3.3 gesehen beträgt die durchschnittliche Temperatur unbewachsener Zellen in den letzten 2000 Iterationen in der Auflösung 20 Meter  $-7.72^{\circ}\text{C}$ . Die Temperaturen unbewachsener Zellen in den anderen untersuchten Auflösungen betragen demgegenüber zwischen  $-13.12^{\circ}\text{C}$  und  $-19.5^{\circ}\text{C}$ . Auch die Temperatur der weissen Daisies ist in der Auflösung 20 Meter gegenüber den anderen Auflösungen erhöht. Dieser Umstand rührt von der direkten Nachbarschaft zur Hitzeinsel. Über die Diffusion beziehen die weissen Daisies Energie von den unbewachsenen Zellen.

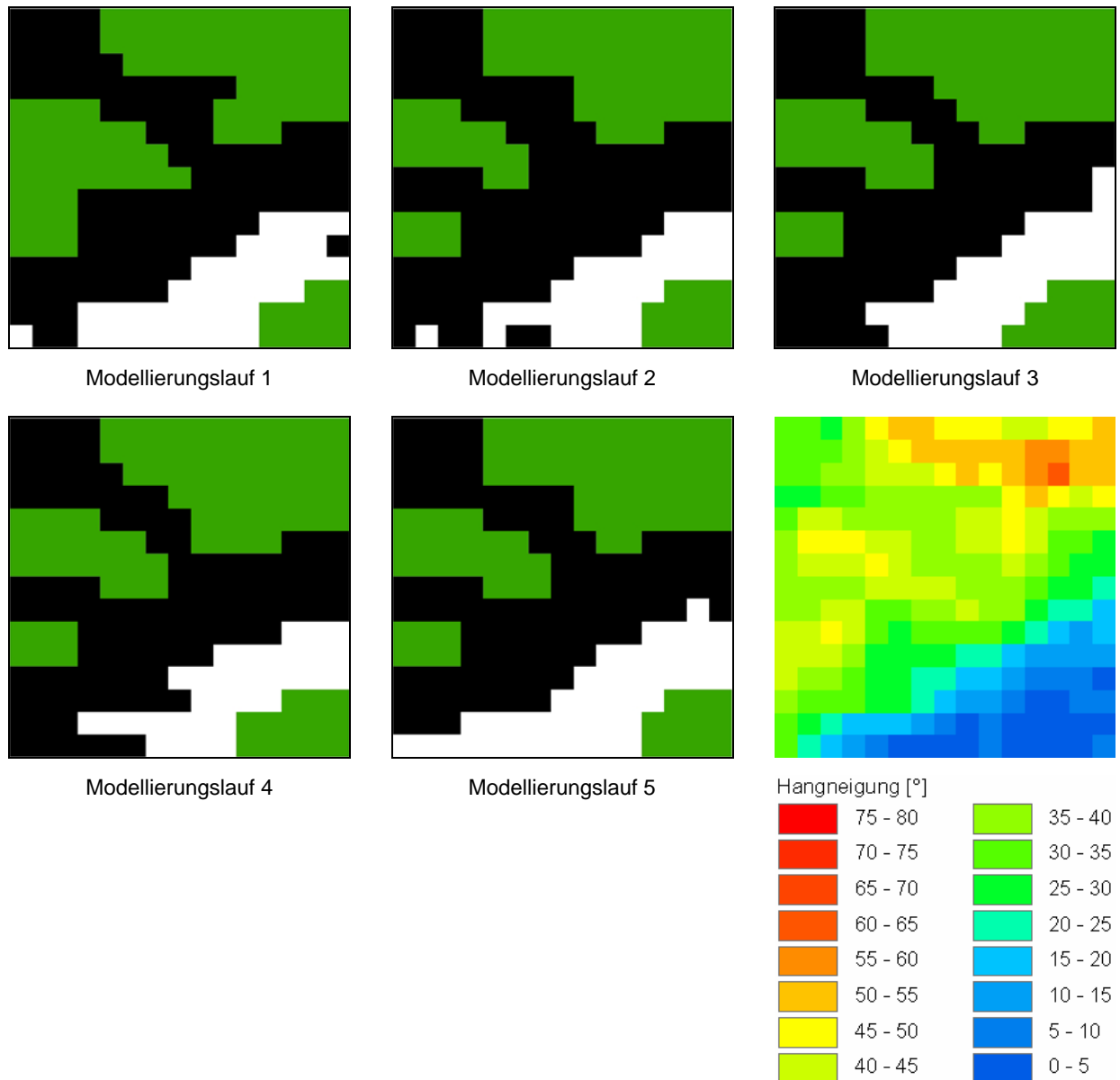


Abb. 38: Dominanzraster und Hangneigung der Auflösung 20 Meter

Die Entmischung der schwarzen und weissen Daisies ist in dieser Auflösung beinahe vollständig. Selbst in dem Gebiet, das weiter oben als Übergangsbereich bezeichnet worden ist, gibt es kaum noch Durchmischung, sondern praktisch nur noch eine klare Grenze zwischen den verschieden-

farbenen Daisies. Natürlich ist die Wahrscheinlichkeit einer Durchmischung mit größerer Auflösung unter anderem auch durch die geringere Gesamtanzahl von Rasterzellen vermindert.

Schliesslich wurden die oben analysierten Dominanzraster für fünf Modellierungsläufe jeder Auflösung in jeweils ein Querschnittsraster vereinigt. Dabei wurden jene Zellen als unbewachsen, schwarz bzw. weiss ausgewiesen, die in allen fünf Modellierungen die jeweilige dominante Landnutzung besaßen. Zellen, die auf diese Weise keiner Landnutzung eindeutig zugewiesen werden konnten, erhielten eine blaue Färbung. Damit die Geländeformen ersichtlich sind, wurden die resultierenden Raster in ESRI ArcScene perspektivisch dargestellt und eine Lichtquelle mit Azimuth  $315^\circ$  und einem Zenithwinkel von  $35^\circ$  simuliert. Zum Vergleich sind diesen Ansichten Abbildungen der Hangneigung im Gebiet zur Seite gestellt. Deren Farbkodierung entspricht den zweidimensionalen Rastern aus den Betrachtungen der Dominanzraster oben. Auf eine erneute Abbildung der Legende wurde verzichtet. Die perspektivische Darstellung mit Schattierung erlaubt kaum das Ablesen quantitativer Werte sondern eher qualitative Betrachtungen.

### 1 Meter Auflösung

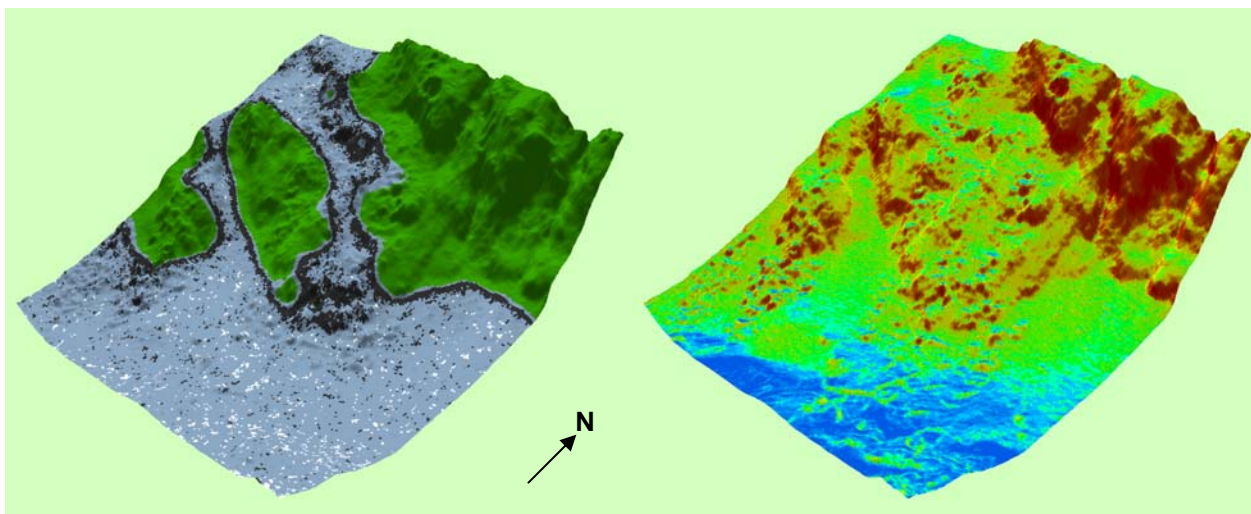


Abb. 39: Querschnittsraster und Hangneigung der Auflösung 1 Meter (grün: unbewachsen; blau: undeterminiert)

In der Abbildung 39 ist eine grosse Anzahl unbestimmter Rasterzellen ersichtlich. Offenbar sind in der Auflösung 1 Meter nur relativ wenige Zellen des Untersuchungsgebiets von einer über die fünf Modellierungsläufe stark determinierten Landnutzung besetzt. Stark determiniert durch alle Modellierungsläufe sind die unbewachsenen Gebiete, der Saum schwarzer Daisies um diese Kälteinseln sowie einige kleiner Gebiete, wo sich Ansammlungen von schwarzen Daisies in allen Modellierungen festsetzen konnten.

Die grosse Anzahl undeterminierter Zellen zeigt, dass die Landnutzung über einen grossen Teil des Untersuchungsgebiets variabel ist. Daraus kann lediglich geschlossen werden, dass die Landnutzungen in den Zellen dieses Gebiets nicht für alle fünf betrachteten Modellierungen identisch sind. Denkbar (aber nicht erwiesen) ist mitunter auch eine grosse zeitliche Variabilität der Landnutzungen in diesem Gebiet bis hin zu einer Oszillation, in der eine Zelle etwa gleich oft von einem schwarzen, einem weissen Daisy oder keinem Daisy bewachsen ist. Eine solche schnelle Abfolge von Landnutzungsarten auf einer Zelle könnte denn auch Hinweise liefern, wie es zu der Temperaturabnormalität weisser und schwarzer Daisies in dieser Auflösung kommen kann. Im Abschnitt 5.3.3 haben wir festgestellt, dass die weissen Daisies mit  $17.75^{\circ}\text{C}$  leicht wärmer sind als die schwarzen Daisies mit  $17.23^{\circ}\text{C}$ . Dies ist eine Umkehrung der Verhältnisse bei sämtlichen gröber aufgelösten Modellierungen. Denkbär wäre, dass in der feinsten Modellierung im undeterminierten Gebiet immer wieder schwarze Daisies wegen Überhitzung sterben und über die Zwischenstufe des unbewachsenen Status einem weissen Daisy Platz machen. Dieses kann zwar nur im lebensfreundlichen Temperaturbereich überhaupt wachsen, es würde aber in dieser Situation vermutlich doch noch eine ungewöhnlich hohe Temperatur erfahren – vorausgesetzt die Ruhephase, in der die Zelle unbewachsen war, dauerte nicht zu lange und es konnte nicht allzu viel Energie durch Diffusion abgeführt werden. Dieses Szenario gibt Hinweise darauf, wie sich die durchschnittliche Temperatur der weissen Daisies stark jener der schwarzen Daisies annähern, aber noch nicht, wie sie jene übertreffen kann. Dazu muss die Gesamtheit der schwarzen Daisies im Untersuchungsgebiet betrachtet werden. Um alle drei Kälteinseln legt sich ein Saum von Zellen, die mit schwarzen Daisies bewachsen sind. Dieser Saum ist in allen fünf Modellierungsdurchläufen enthalten. Die schwarzen Daisies können die Umgebungstemperatur an der Grenze des unbewachsenen Gebiets durch ihre relativ tiefe Albedo leicht erhöhen und sind deshalb an diesem Ort lebensfähig. Die durchschnittliche Temperatur in diesem Saum schwarzer Daisies beträgt ungefähr  $7.3^{\circ}\text{C}$ . Diese Temperatur steht einer durchschnittlichen Temperatur aller schwarzen Daisies von  $17.23^{\circ}\text{C}$  in dieser Auflösung gegenüber. Die Säume schwarzer Daisies mit verhältnismässig tiefer Temperatur tragen also mit dazu bei, dass die durchschnittliche Temperatur der schwarzen Daisies in der Auflösung 1 Meter unter jener der weissen Daisies zu liegen kommt.

### 2.5 Meter, 5 Meter und 10 Meter Auflösung

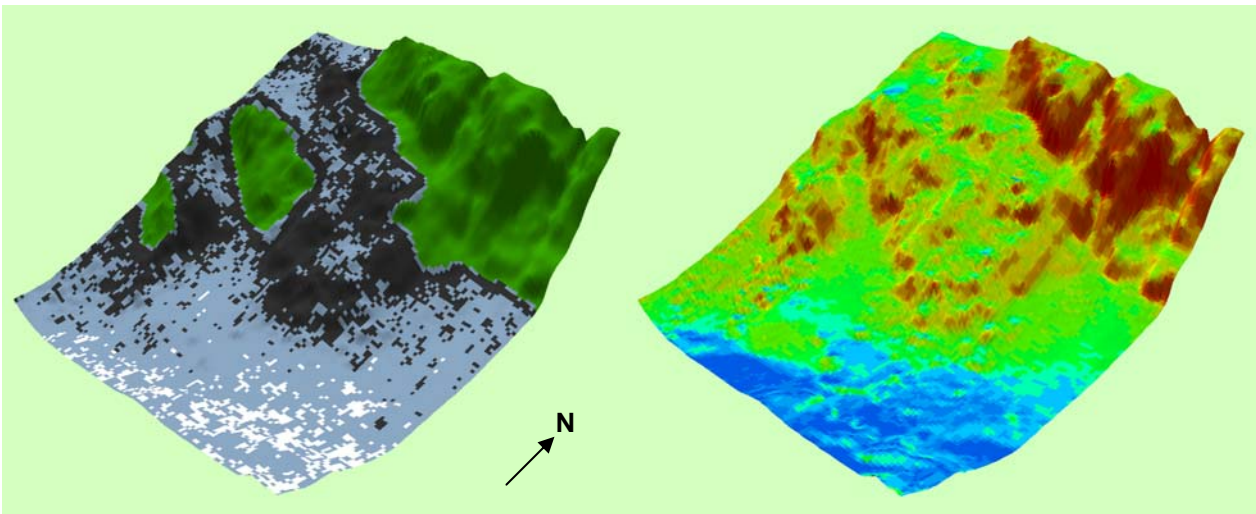


Abb. 40: Querschnitttraster und Hangneigung der Auflösung 2.5 Meter

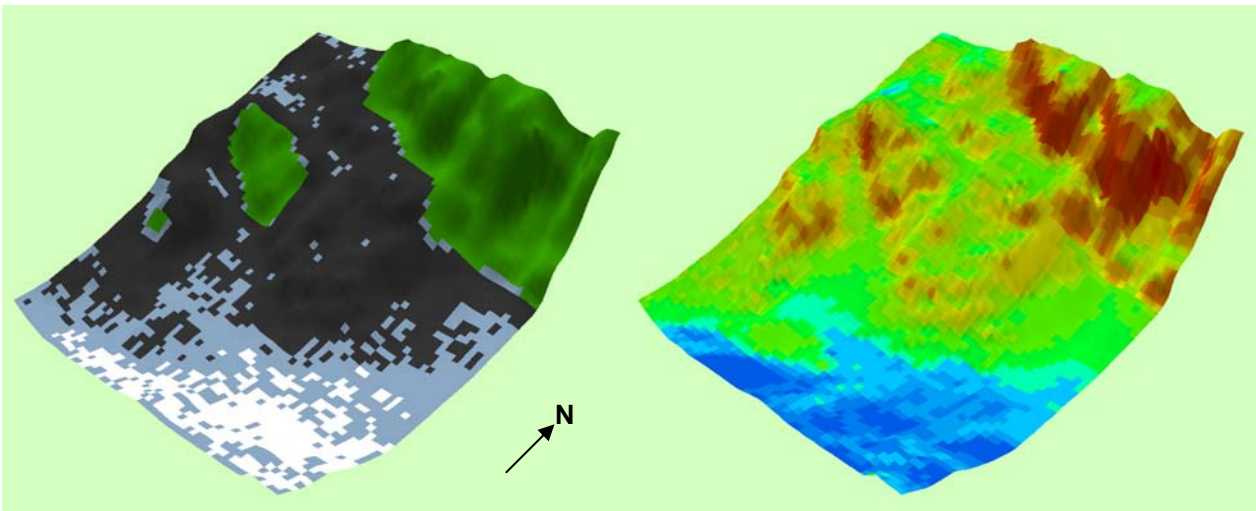


Abb. 41: Querschnitttraster und Hangneigung der Auflösung 5 Meter

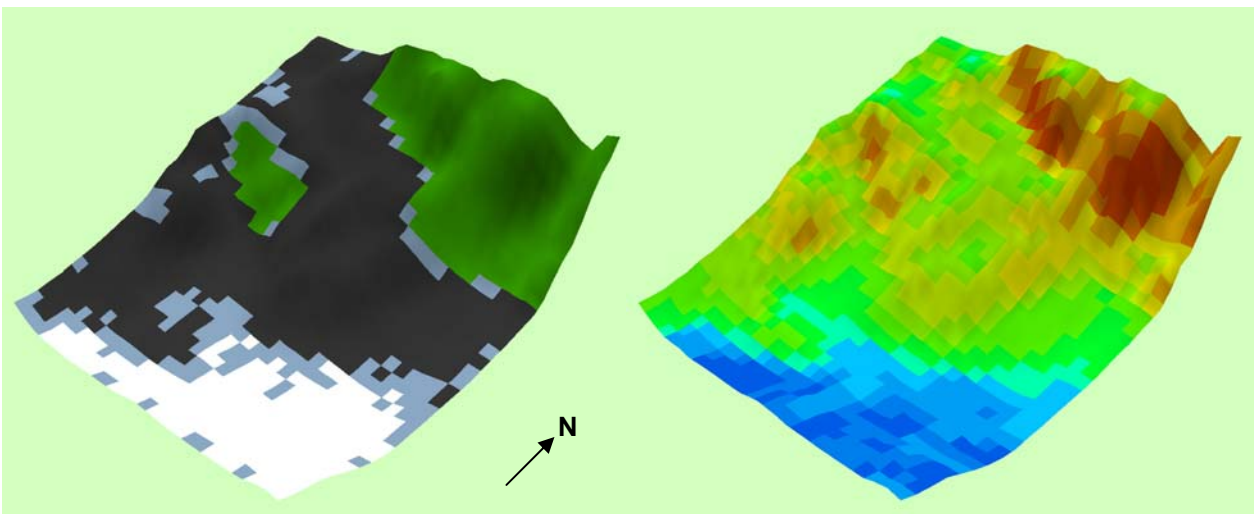


Abb. 42: Querschnitttraster und Hangneigung der Auflösung 10 Meter

In der Auflösung von 2.5 Metern sind anteilmässig weniger Zellen undeterminiert. Insbesondere die schwarzen Daisies treten im nördlichen Teil des Untersuchungsgebiets bestimmter auf. Der Eindruck der Auflösung 2.5 Meter verstärkt sich in jener von 5 Metern Auflösung. Die stärkere Determiniertheit der einzelnen Landnutzungen in den einzelnen Modellierungsläufen stimmt überein mit der schon weiter oben festgestellten Tendenz zur Entmischung in gröberen Auflösungen (vgl. Abbildungen 40 bis 42).

### 20 Meter Auflösung

In der Auflösung von 20 Metern tritt wie schon weiter oben beschrieben ein neues Phänomen auf. In der südöstlichen Ecke des Untersuchungsgebiets entstand in allen fünf betrachteten Modellierungsläufen eine neue vegetationslose Fläche. Die dreidimensionalen Darstellungen der verschieden aufgelösten Modellierungen erhellen die Ursache für diese unbewachsene Fläche. In den feineren Auflösungen tritt an dieser Stelle ein noch mehr oder weniger stark ausgebildetes Relief auf. Dieses verflacht mit gröberer Auflösung zusehends. In der Auflösung 20 Meter ist es schliesslich kaum mehr wahrzunehmen (vgl. Abbildung 43). Vermutlich entsteht durch dieses Einebnen des Reliefs und den damit einhergehenden geringen Hangneigungswerten in diesem Gebiet ein Energieüberschuss. Dieser Energieüberschuss kann offenbar nicht einmal mehr durch die hohe Albedo weisser Daisies genügend abgebaut werden und die Temperatur übersteigt deshalb die obere Grenze des lebensfreundlichen Bereichs.

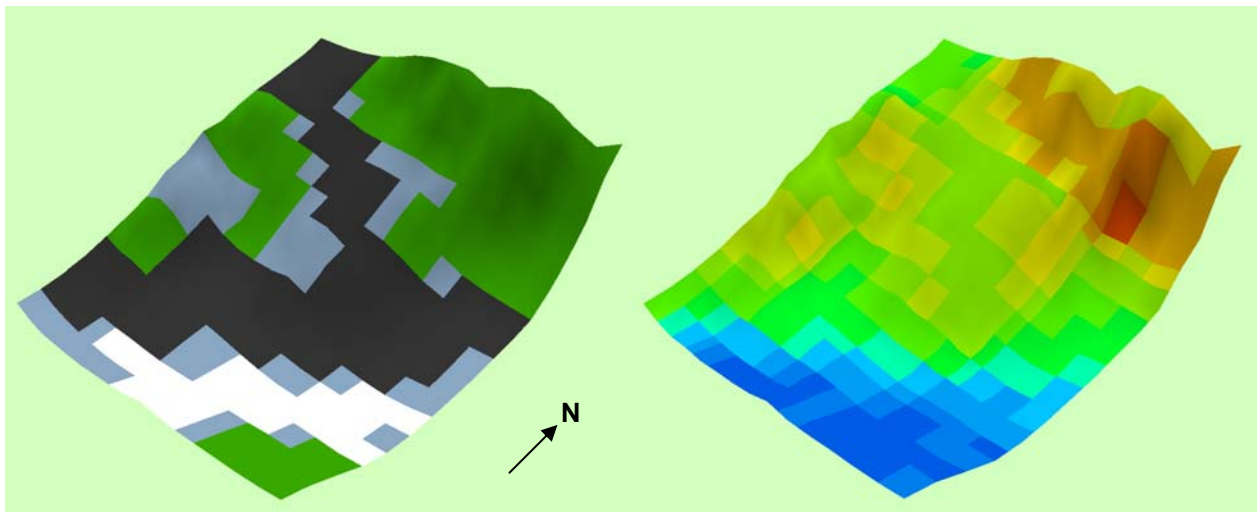


Abb. 43: Querschnitttraster und Hangneigung der Auflösung 20 Meter



## 5.5. Quellen von Modellierungsunterschieden

In diesem Abschnitt sollen mögliche Quellen von den oben aufgezeigten Modellierungsunterschieden zusammenfassend aufgelistet und beschrieben werden.

### 5.5.1. Geländeeinflüsse

Abbildung 44 zeigt die detaillierte Statistik der Hangneigung im Untersuchungsgebiet. Ein typischer auflösungsabhängiger Effekt ist das „Verwischen“ steiler Hänge. Die maximale Hangneigung beträgt für 1 Meter Auflösung noch circa  $83^\circ$ . Mit gröber werdender Auflösung sinkt das Maximalgefälle bis auf  $60^\circ$  in 20 Metern Auflösung. Dieses Auslöschen steiler Hänge führt zu einer geringeren durchschnittlichen Hangneigung für gröbere Auflösungen.

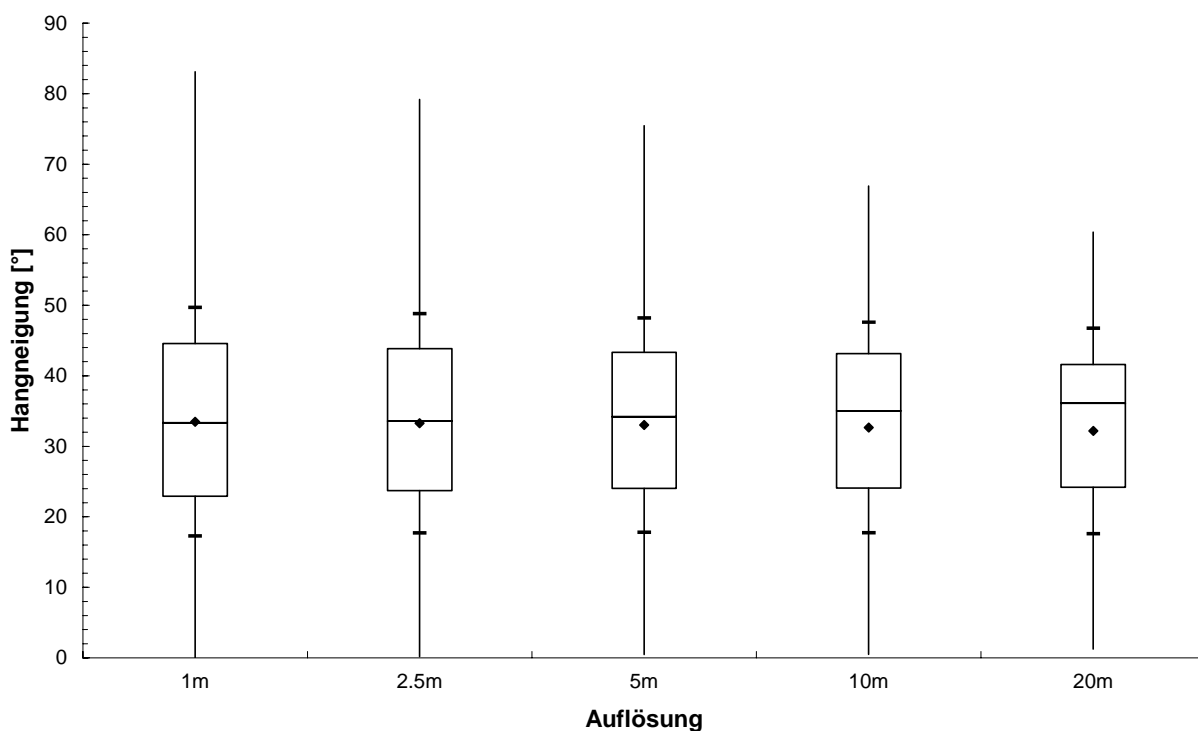


Abb. 44: Box-Whisker-Plot der Hangneigung

Mit der durchschnittlichen Hangneigung nimmt infolge geringerer Spannweiten auch die Standardabweichung ab. Die minimalen Hangneigungswerte sind in allen untersuchten Auflösungen etwa gleich gross. Es werden also in allen Auflösungen ebene Gebiete repräsentiert.

Auffallend ist das Ansteigen des Medians mit gröber werdender Auflösung. Der Median verhält sich also invers zum Mittelwert der Hangneigung. Dies erklärt sich durch die veränderte Verteilung der Hangneigungswerte in den gröberen Auflösungen. Wie die Quartile zeigen, konzentriert sich ein grosser Teil der Hangneigungswerte der Auflösung 20 Meter über dem Median

in einem sehr schmalen Intervall. Die Hangneigungswerte unterhalb des Medians sind aber derart verteilt, dass die mittlere Hangneigung für größere Auflösungen geringer wird.

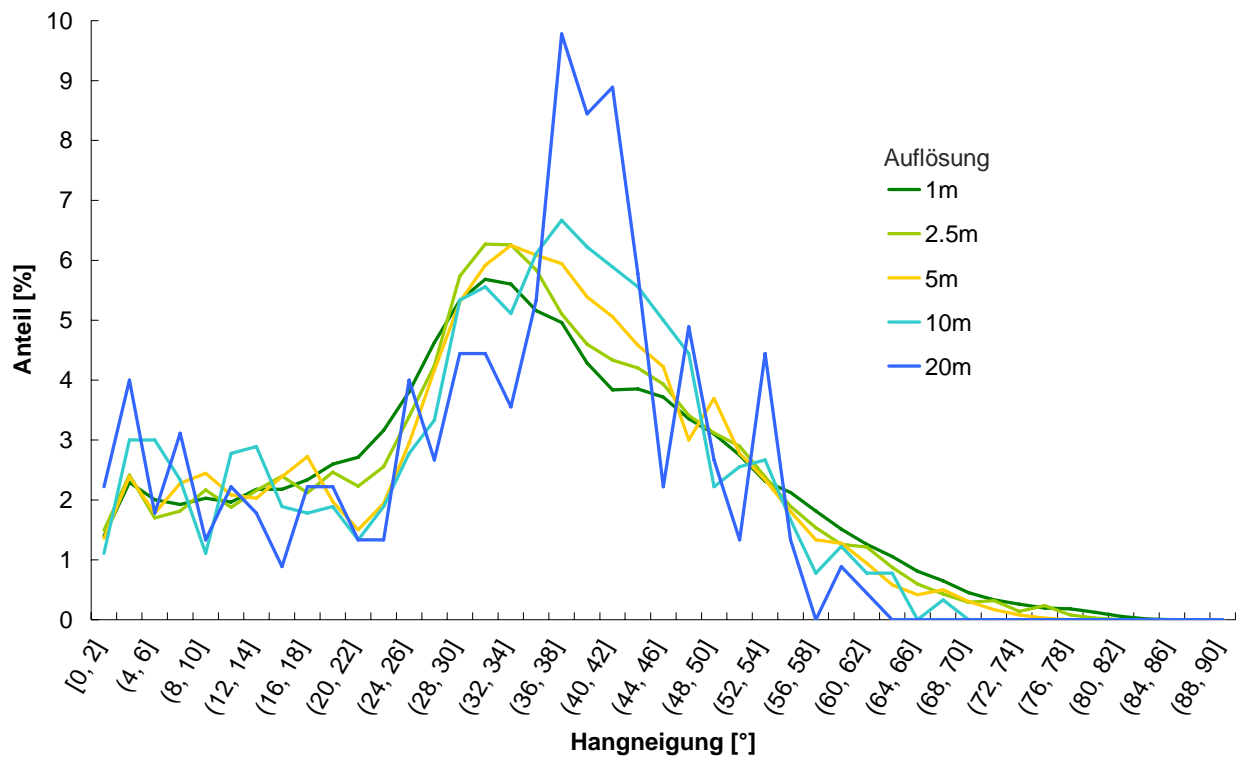


Abb. 45: Verteilung der Hangneigung

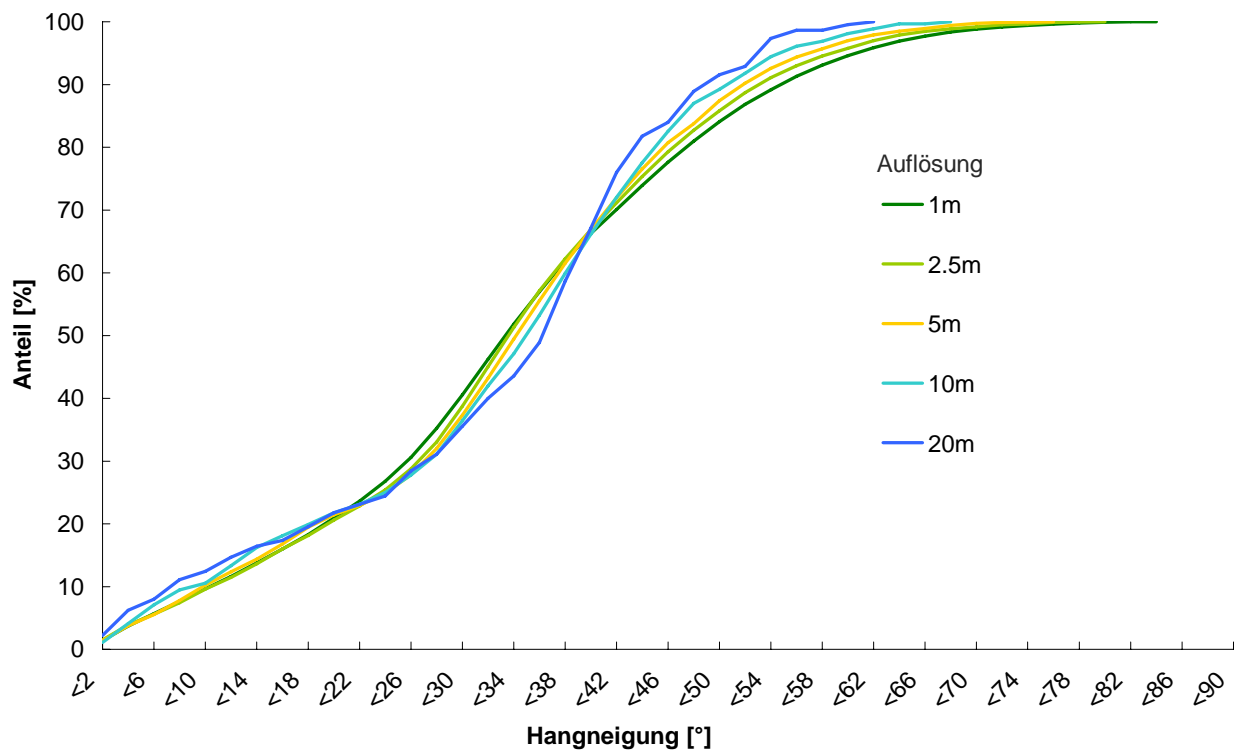


Abb. 46: Kumulative Verteilung der Hangneigung



Die Abbildungen 45 und 46 zeigen die Verteilung bzw. die kumulierte Verteilung der Hangneigungswerte im Untersuchungsgebiet für Daisyworld. Auffallend ist eine deutliche Anomalie der Auflösungen 10 und 20 Meter im Bereich von circa  $36^\circ$  bis  $42^\circ$ . Wenn man den Sachverhalt räumlich betrachtet, wird offenbar, dass das ausgeprägte Maximum vor allem vom Verschieben in feineren Auflösungen höher vorliegender Hangneigungswerte in diesen Bereich herrührt. In den Bereichen von circa  $26^\circ$  bis  $36^\circ$  ist vor allem die Auflösung von 20 Metern gegenüber allen anderen Auflösungen deutlich untervertreten.

Eindeutige Zusammenhänge zwischen den hier summarisch in Form eines Box-Whisker-Plots gegebenen Statistik bzw. der (kumulierten) Verteilung der Hangneigungswerte und den Modellierungsergebnissen von Daisyworld sind schwer auszumachen. Der Anteil weisser Daisies beispielsweise sinkt für gröbere Auflösungen tendenziell, während der Anteil schwarzer Daisies steigt (mit Ausnahme von 20 Metern Auflösung). Diese Beobachtung lässt sich aber nicht ohne weiteres kausal mit der Statistik der Hangneigung verknüpfen. Vielmehr muss auf die weiter oben angestellten (Einzelfall-)Überlegungen verwiesen werden, die auch auf der Hangneigung gründen. Als Beispiel für eine hangneigungsinduzierte Modellierungsdifferenz kann das vegetationslose Gebiet angeführt werden, das nur in der größten untersuchten Auflösung erscheint. Daneben können bezüglich des Zusammenhangs von Hangneigung und Modellierungsunterschieden vor allem globale Aussagen gemacht werden. Wie aus den dreidimensionalen Darstellungen des Abschnitts 5.4 ersichtlich ist, weist das Gelände in den feineren Auflösungen ein Mikrorelief im Bereich von einigen Metern auf. Dieses Mikrorelief verschwindet in den gröberen Auflösungen zusehends. Als Folge davon verschwinden charakteristische, weniger steile oder sogar ebene Gebiete im nördlichen, steil geneigten Südhang. Dies entzieht den weissen Daisies in diesem Gebiet die Lebensgrundlage. Im steilen Gebiet, das mit den gröberen Auflösungen noch repräsentierbar ist, vermögen sie nicht genügend Einstrahlungsenergie zu speichern und sterben zusehends aus. Der umgekehrte Effekt kann in den flacheren Lagen im Süden des Untersuchungsgebiets beobachtet werden. Beide Erscheinungen zusammen bewirken die in Abschnitt 5.4 geschilderte Entmischung der beiden Daisy-Arten.

### **5.5.2. Granularität**

Ein weiterer Faktor für Modellierungsunterschiede ist vermutlich die Granularität der Untersuchung. Granularität ist ein Mass dafür, in wie viele diskrete Elemente eine Entität unterteilt werden kann. In Daisyworld sind die diskreten Elemente die einzelnen Rasterzellen, auf die der Zelluläutomat wirkt. Die Entität ist das Untersuchungsgebiet. Eine hohe Auflösung in Daisyworld impliziert auch eine hohe Granularität der Untersuchung. Diese bestimmt das Gewicht,

das einem einzelnen Element an der gesamten Untersuchung zukommt. Im Fall von Daisyworld hat eine einzelne Rasterzelle in einer groben Auflösung mehr Gewicht am Ganzen als in einer feineren Auflösung.

Die Granularität kann mit dem Anteil einer Zelle am gesamten Untersuchungsgebiet,  $\delta_{\text{Zelle}}$ , operationalisiert werden:

$$\delta_{\text{Zelle}} = \left( \frac{s}{dx} \right)^{-2} \quad (5.1)$$

s: Kantenlänge des quadratischen Untersuchungsgebiets

dx: Auflösung

Der Anteil einer Zelle an der Gesamtzellenzahl des Untersuchungsgebiets ist eine quadratische Funktion der gewählten Auflösung. Er steigt also für gröbere Auflösungen stark an. Tabelle 7 zeigt die Werte für die verwendeten Auflösungen in Daisyworld.

Tab. 7: Gewicht einer Rasterzelle in der Modellierung

Auflösung	Anzahl Zellen insgesamt	Anteil einer Zelle am Untersuchungsgebiet
1 Meter	90'000	0.00111%
2.5 Meter	14'400	0.00694%
5 Meter	3'600	0.02778%
10 Meter	900	0.11111%
20 Meter	225	0.44444%

Diese Gewichte der einzelnen Zellen implizieren verschiedene Systemreaktionen auf Veränderungen. Eine einzelne Rasterzelle in Daisyworld ist die kleinste Einheit, in der Veränderungen (zum Beispiel in Bezug auf die Landnutzung, die lokale Temperatur etc.) vonstatten gehen können. Eine lokale Veränderung in einer groben Auflösung zeitigt also ungleich grössere Folgen für das Gesamtsystem als in einer feineren Auflösung. Mitunter kann ein grob aufgelöstes System leichter durch eine Veränderung in einem Element (einer Rasterzelle) vorübergehend destabilisiert werden. Dieser Effekt wird in den Verlaufskurven der Modellgrößen des Abschnitts 5.3 ersichtlich. Die gröberen Auflösungen weisen stets mehr und stärkere Ausschläge auf als die feinen Auflösungen.

### 5.5.3. Ränder des Untersuchungsgebiets

Ein Begleiteffekt, den die unterschiedliche Granularität unterschiedlich aufgelöster Untersuchungen verursacht, ist der unterschiedlich grosse Anteil an Rand am Untersuchungsgebiet. Der Anteil Rand am gesamten Untersuchungsgebiet,  $\delta_{\text{Rand}}$ , berechnet sich gemäss:

$$\delta_{\text{Rand}} = \left( 4 \cdot \left( \frac{s}{dx} - 1 \right) \right) / \left( \frac{s}{dx} \right)^2 = 4 \cdot \frac{s - dx}{dx \cdot (s/dx)^2} = 4dx^2 \cdot \frac{s - dx}{dx \cdot s^2} \quad (5.2)$$

s: Kantenlänge des quadratischen Untersuchungsgebiets

dx: Auflösung

$\delta_{\text{Rand}}$  verhält sich also direkt proportional zu der gewählten Auflösung. Tabelle 8 zeigt  $\delta_{\text{Rand}}$  für Daisyworld in den untersuchten Auflösungen.

Tab. 8: Gewicht der Randrasterzellen in der Modellierung

Auflösung	Anzahl Randzellen	Anzahl Zellen insgesamt	Anteil Rand am Total
1 Meter	1196	90'000	1.329%
2.5 Meter	476	14'400	3.306%
5 Meter	236	3'600	6.556%
10 Meter	116	900	12.889%
20 Meter	56	225	24.889%

Die Grösse  $\delta_{\text{Rand}}$  ist für die Untersuchung von Daisyworld wichtig wegen der Modellierung der Umweltbedingungen. Wie im Abschnitt 4.3.4 ausgeführt, gelten in Daisyworld für den Rand des Untersuchungsgebiets spezielle Berechnungsregeln. Die Randzellen sind nicht von acht Nachbarzellen umgeben, sondern von fünf oder sogar nur drei Zellen. Es sind also nicht alle acht umgebenden Temperaturwerte definiert. Aus diesem Grund können in der Modellierung für die Randzellen die Wärmediffusion in x- und y-Richtung nicht gemäss Formel (4.4), S. 19 berechnet werden. Die verwendete Implementierung von Daisyworld behilft sich damit, die Diffusionswerte der Zellen unmittelbar innerhalb des Quadrats von Randzellen nach aussen zu spiegeln. Die Unvollständigkeit der Ausgangsinformationen am Rand des Untersuchungsgebiets muss also in der Modellierung mit einer Hilfskonstruktion umgangen werden. Es kann mitunter nicht davon ausgegangen werden, dass die Modellierung der Wärmediffusion als Anteil an der Energiebilanz an den Rändern von Daisyworld realistisch ausfällt. Diese mögliche Verfälschung der Modellie-

ung betrifft nun wegen der unterschiedlichen Granularität nicht alle Modellierungen der untersuchten Auflösungen gleich stark. Die Beeinflussung der Modellierung nimmt bei größer werdender Auflösung stark zu. Von der Auflösung 1 Meter bis zur Auflösung 20 Meter steigt das Gewicht des Randes am Untersuchungsgebiet um den Faktor 19 an. Insbesondere die diversen im Abschnitt 5.3 geschilderten Anomalien in der Modellierung mit 20 Metern Auflösung sind eventuell auf diesen Umstand zurückzuführen. In der Auflösung von 20 Metern beträgt der Randanteil fast 25%, d.h. nur 75% der Wärmediffusion sind aufgrund der Nachbarschaftsbeziehungen berechnet worden.

#### **5.5.4. Definition des Zelluläutomaten und der Diffusion**

Ein augenfälliger Unterschied zwischen den Modellierungen verschiedener Auflösungen liegt in der metrischen Ausdehnung des Zelluläutomaten und in der Reichweite der Wärmediffusion während eines Zeitschritts. Die Ausdehnung eines Zelluläutomaten erfolgt quasi per Definition über die Nachbarschaft und damit über die Zellgröße. Es resultieren unterschiedliche Ausdehnungen des Daisyworld-Zelluläutomaten in verschiedenen Auflösungen. So misst der Durchmesser des Zelluläutomaten bei 20 Metern Auflösung 60 Meter, bei 1 Meter Auflösung aber lediglich 3 Meter. Die unterschiedliche Ausdehnung des Zelluläutomaten impliziert eine unterschiedlich feine Modellierung. Es sind eben nicht nur die Grundlagedaten in unterschiedlich feinen Auflösungen vorhanden. Sondern auch der Zelluläutomat, der darauf wirkt und der das Verhalten der Daisies in Daisyworld modelliert, ist unterschiedlich fein ausgestaltet. Er berücksichtigt bei der Modellierung (metrisch betrachtet) nicht immer eine gleich grosse Nachbarschaft. Würde der Zelluläutomat statt über die Nachbarzellen mittels einer absoluten Distanz definiert, würde dies wohl die Modellierung verändern. Beispielsweise würde ein Zelluläutomat mit 60 Metern Ausdehnung zwar bei feinerer Auflösung der Höhendaten im Vergleich zu groben Auflösungen immer mehr auf einem Mikrorelief wirken. Allerdings würden diese kleinen Geländeundulationen, die in größeren Auflösungen nicht repräsentierbar sind, durch den einheitlich definierten Zelluläutomaten gemittelt. Vermutlich würden die auflösungsinduzierten Unterschiede in den topographischen Eigenschaften auch in solch einer Modellierung Unterschiede in den Resultaten zeitigen. Es ist aber denkbar, dass diese infolge der einheitlichen Mittelung der Topographie geringer als in der vorliegenden Untersuchung ausfallen würden.

Ähnlich wie der Zelluläutomat ist auch die Wärmediffusion in Daisyworld zellenbasiert definiert (vgl. Formel (4.4), S. 19). Sie wird mittels der Nachbarzellen in x- und y-Richtung berechnet und wirkt pro Zeitschritt auch von Zelle zu Zelle. Betrachtet man die absoluten Distanzen pro Zeit wirkt die Wärmediffusion zwischen zwei Gebieten in den größeren Auflösungen

also schneller als in den feineren. Die konkreten Auswirkungen dieses Unterschieds in der Ausbreitung der Energie durch Diffusion zu eruieren ist nicht einfach. Dadurch, dass die Wärmediffusion in feineren Auflösungen langsamer verläuft, verhalten sich diese Systeme wohl etwas träger oder auch stabiler. Treten durch Veränderungen im Bewuchs Veränderungen in der Temperatur in einer Region auf, wirkt sich diese Veränderung langsamer als bei groben Auflösungen auf andere Gebiete aus. Betrachten wir eine Wärmewelle, die sich von einem Ort mit erhöhter Temperatur ausbreitet. Bei jedem Iterationsschritt, den die Energie von ihrem Ursprungsort zu ihrem Zielort benötigt, geht Energie durch langwellige Abstrahlung verloren. Das heisst, im konkreten Beispiel erreicht eine geringere Energiemenge den Zielort. Eine gröber aufgelöste Daisyworld muss also über einen viel direkteren Energieaustausch zwischen verschiedenen Regionen verfügen als eine fein aufgelöste Daisyworld.

## 6. Zusammenfassung Daisyworld

- Für die Untersuchung wurden DTM der Auflösungen 1, 2,5, 5, 10 und 20 Meter erstellt. Diese wurden für eine Modellierung von Daisyworld verwendet.
- Der Vergleich der einzelnen Modellierungsdurchläufe erfolgte anhand der Anteile der einzelnen Landnutzungen und anhand des Verlaufs und statistischer Masse von physikalischen Kenngrößen wie Hangneigung, Einstrahlung und Temperatur pro Landnutzung sowie anhand von Zähl-, Dominanz- und schliesslich Querschnittstrastern.

Gibt es abhängig von der Auflösung der verwendeten Eingangs-Höhendaten Unterschiede in den Resultaten eines fokal aggregierenden Modells wie Daisyworld?

Wie lassen sich die Unterschiede charakterisieren?

Es wurden zahlreiche Unterschiede in den einzelnen Modellierungen unterschiedlicher Auflösungen gefunden.

- Anhand der aggregierten Statistiken und anhand des Verlaufs sowohl der Anteile der Landnutzungen als auch der physikalischen Kenngrößen konnten kaum lineare Trends, wohl aber deutliche auflösungsinduzierte Unterschiede ausgemacht werden.
- Am wenigsten unterschieden sich die verschiedenen Modellierungen in bezug auf die Hangneigung und kurzweilige Einstrahlung pro Landnutzung.
- Oft wurde ein im Ansatz vorhandener linearer Trend entlang der Auflösungsachse von der Modellierung mit 20 Metern Auflösung durchbrochen. Dieser Umstand sowie die vertiefte Betrachtung des Modellgefüges und möglicher topographieunabhängiger Quellen für Modellierungsunterschiede legen nahe, dass bei verschiedenen Auflösungen nicht nur lineare, gleichgerichtete Veränderungen auftreten.
- In den räumlichen Betrachtungen der Modellierungsergebnisse konnte ein gradueller Übergang von einer auf die Landnutzung bezogen gut durchmischten Daisyworld (1 Meter Auflösung) zu einer praktisch vollständig entmischten (20 Meter Auflösung) festgestellt werden.

Lassen sich die räumlichen Gebiete, in denen die Unterschiede besonders stark sind, charakterisieren?

Als besonders stark für die Modellierungsunterschiede verantwortliche Gebiete konnten zwei Geländetypen eruiert werden.

- Kleine (relativ) ebene Gebiete und Gebiete im Südhang, die über eine von Süden abweichende Exposition verfügten, wurden mit gröber werdender Auflösung der DTM immer schlechter und schliesslich gar nicht mehr repräsentierbar.
- Eine fast horizontale, aber von leichten Unebenheiten durchzogene Fläche im Untersuchungsgebiet wurde mit gröber werdender Auflösung immer stärker eingeebnet.
- Beide Prozesse führten zu nachhaltigen Veränderungen im Strahlungshaushalt der genannten Gebiete. Diese wiederum schlugen sich nieder in verändertem Bewuchs und in den aggregierten Statistiken.

Welche möglichen Ursachen für Modellierungsunterschiede können ausgemacht werden?

Im letzten Abschnitt konnten vier wesentliche Quellen von Modellierungsunterschieden ausgemacht und deren Auswirkung auf die Modellierung soweit möglich geschildert werden.

- Geländeeinflüsse, Repräsentation der Topographie
- Granularität der Modellierung
- Anteil Rand am Untersuchungsgebiet
- Reichweite des Zelluläutomaten und der Diffusion, die beide über die Nachbarschaft und damit nicht über eine fixe metrische Schrittweite definiert sind.

## 7. Global aggregierendes Modell: TOPMODEL

In der Folge wird auf die Untersuchung anhand des global aggregierenden Modells, TOPMODEL, eingegangen.

TOPMODEL ist ein hydrologisches Niederschlagsabfluss-Modell, das die Bildung von Abflusswasser mit der Topographie des betrachteten Geländes verbindet. Von daher rührt auch der Name. TOPMODEL entspricht TOPographic MODEL. Es wurde 1979 von Beven und Kirkby veröffentlicht.

Das Modell basiert im wesentlichen auf dem sogenannten Topographischen Index. Dieser wird benutzt, um Aussagen über die Grundwassertiefe an einem Ort treffen zu können. Es kann angenommen werden, dass sich Gebiete mit ähnlichem Topographischen Index hydrologisch ähnlich verhalten (Brasington und Richards 1998). Die Berechnung von Ablusssmengen kann sich deshalb auf diskretisierte vorkommende Indexwerte beschränken. Sie muss nicht für jeden Punkt (bzw. für jede Rasterzelle) im betrachteten Einzugsgebiet einzeln durchgeführt werden, wie dies für ein sogenanntes verteiltes hydrologisches Modell (*distributed model*) der Fall ist. Modelle, die Berechnungen nur auf aggregierten Repräsentationen eines Einzugsgebiets (also zum Beispiel auf gemittelten Attributen) vornehmen, heissen *lumped models*. TOPMODEL ist weder ein *lumped* noch ein *distributed model*, sondern wird allgemein als *semi-distributed model* – also als halb-verteiltes Modell – bezeichnet. Die Modellierung erfolgt zwar nicht für jeden Punkt im Raum einzeln, sondern auf der Verteilungsfunktion des Topographischen Index. Die damit modellierten wassergesättigten Flächen können aber in eine räumliche Repräsentation rücküberführt werden.

Durch seine halb-verteilte Modellstruktur ist TOPMODEL sehr gut geeignet, auch mit grossen Datensätzen zu modellieren. Ist der Topographische Index auf Basis von Höhendaten einmal berechnet, gibt es keinen Unterschied im Prozessierungsaufwand zwischen einer Modellierung mit einem Meter Auflösung und einer mit einem Kilometer Auflösung. Dieser Umstand führte dazu, dass schon einige Untersuchungen von TOPMODEL mit sehr feinen Auflösungen durchgeführt worden sind.

In den nächsten Abschnitten wird genauer auf die Modellstruktur von TOPMODEL eingegangen. Anschliessend werden exemplarisch wichtige Arbeiten und deren Erkenntnisse über TOPMODEL dargestellt. Danach wird auf die Modellierungsmethodik in der vorliegenden Arbeit eingegangen, bevor dann die Analyse der Resultate von TOPMODEL folgt.



## 7.1. Konzept der Variablen Beitragenden Fläche

TOPMODEL implementiert das hydrologische Konzept der Variablen Beitragenden Fläche. Diese generiert wichtige Bestandteile des Abflusses aus einem Einzugsgebiet. Beven und Kirkby (1979) unterscheiden im wesentlichen vier Arten der Entstehung von Abfluss:

1. Die Regenintensität übersteigt die Infiltrations- oder Speicherkapazität des Bodens und es kommt zu überirdischem Abfluss im ganzen Einzugsgebiet. Dies ist das sogenannte Hortonsche Modell. In feuchten, temperierten Gebieten mit Vegetationsdecke ist die gemessene Infiltrationskapazität aber höher als übliche Niederschlagsintensitäten und der Hortonsche Mechanismus kommt daher in der Regel nicht zum Tragen. (Kirkby 1969 und Freeze 1972, zitiert in Beven und Kirkby 1979: 44).
2. Die Niederschlagsintensität übersteigt die Infiltrations- oder Speicherkapazität auf einer in der Ausdehnung und Lage variablen Fläche beinahe gesättigten Bodens. Darauf gründet das *partial area conceptual model* von Betson (1964, zitiert in Beven und Kirkby 1979: 44). Dieses besagt, dass manche Teile eines Einzugsgebiets wegen räumlich inhomogener Infiltrationskapazitäten und unterschiedlicher Befeuchtung der Bodenoberfläche infolge lateralen Wasserabflusses mit grösserer Wahrscheinlichkeit oberirdischen Abfluss generieren als andere.
3. Regen, der auf Abflusskanäle und auf vollständig gesättigte Böden fällt (die in der Regel gleich neben den Abflusskanälen liegen), beeinflusst direkt den Verlauf der Abflussganglinie während eines Niederschlagsereignisses.
4. Laterales Fliessen gesättigten und ungesättigten Bodenwassers. Der grösste Teil dieses Abflusses findet im Boden statt. Lokal kann aber die Speicherkapazität des Bodens überschritten werden und das Wasser kann wieder aus dem Boden austreten und oberirdisch abfliessen (*return flow*). Die unterirdischen Anteile des lateralen Abflusses fließen viel langsamer als die oberirdischen und tragen deshalb in der Regel nicht zur Spitze in der Abflussganglinie während eines Niederschlagsereignisses bei.

In kleineren, feucht-temperierten Einzugsgebieten sind vor allem die Prozesse 2 und 3 Quellen von niederschlagsinduziertem Abfluss. Der eher stetige unterirdische Abfluss ist aber ebenfalls wichtig. Er bestimmt die Lage, Menge und Ausdehnung von Bodenwasser, welches bei weiterem Niederschlag Oberflächenabfluss bewirken kann (Beven und Kirkby 1979: 45). Das Konzept der Variablen Beitragenden Fläche besagt nun, dass je nach Niederschlagsgeschichte unterschiedliche Gebiete zum Oberflächenabfluss und zum *return flow* beitragen. „The water identified as the response to a given [rainfall] event may originate on only a fraction of the watershed; this frac-

tion is called the contributing area. The extent of the contributing area may vary from event to event and during an event” (Dingman 2002: 392). Konkret expandiert die Variable Beitragende Fläche tendentiell in Phasen, in denen das Einzugsgebiet feuchter wird, und kontrahiert, wenn das Einzugsgebiet trockener wird.

## 7.2. Modellbestandteile

Abbildung 47 zeigt die Bodenstruktur, wie sie in TOPMODEL repräsentiert wird. Der Boden teilt sich dabei auf in den Speicher der Wurzelzone (RZ), den Speicher der ungesättigten Zone (UZ) und der gesättigten Zone (SZ). Die Gebiete, wo die gesättigte Zone bis an die Bodenoberfläche reicht, stellen zusammengenommen die aktuelle Beitragende Fläche dar. Ist der Speicher der Wurzelzone mit Wasser gefüllt, gelangt Niederschlagswasser in die ungesättigte Zone. In und aus dieser fließt das Wasser vertikal nach unten und speist die gesättigte Zone.

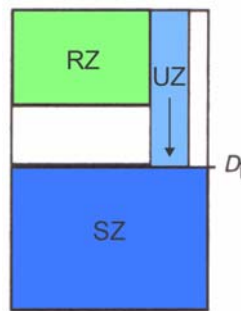


Abb. 47: Bodenstruktur  
in TOPMODEL  
Quelle: Beven 2001a: 211

Im folgenden Abschnitt wird zuerst auf die Modellierung der Variablen Beitragenden Fläche anhand des Topographischen Index und auf die Generierung des oberirdischen Abflusses eingegangen. Im zweiten Abschnitt wird die Entstehung von Basisabfluss aus der gesättigten Zone erläutert. Im dritten Abschnitt werden schliesslich die Modellierung der Wurzelzone und der ungesättigten Zone geschildert.

### 7.2.1. Modellierung der Variablen Beitragenden Fläche

TOPMODEL und insbesondere die Modellierung der Variablen Beitragenden Fläche basieren auf drei Annahmen (Beven 2001a: 208):

- Es gibt eine wassergesättigte Zone, die sich im Gleichgewicht mit einer *steady recharge rate* auf einer höher gelegenen entwässernden Fläche befindet.
- Der Grundwasserspiegel verläuft parallel zur Oberfläche. Der hydraulische Gradient kann deshalb als äquivalent zum Tangens der lokalen Hangneigung angenommen werden.
- Das Profil der hydraulischen Transmissivität kann mit einer exponentiellen Funktion des Speicherdefizits beschrieben werden. Die hydraulische Transmissivität beträgt  $T_0$ , wenn der Boden bis zur Oberfläche gesättigt und das Speicherdefizit  $D_i$  also null ist.

Unter diesen Annahmen kann an jedem Punkt (x,y) die Rate gesättigten unterirdischen Abflusses pro Höhenlinienlänge beschrieben werden mit:

$$q_{x,y} = T_0 \cdot \tan \beta \cdot \exp(-D_{x,y}/m) \quad (7.1)$$

$T_0$ : Transmissivität [ $\text{m}^2 \text{h}^{-1}$ ]

$\beta$ : lokale Hangneigung [ $^\circ$ ]

$D_{x,y}$ : lokales Speicherdefizit (Tiefe zum Grundwasserspiegel) [m]

$m$ : Parameter zur Steuerung der Abnahme der Transmissivität mit steigendem Speicherdefizit [m]

Unter Annahme eines stationären Zustands des Flusses im Boden und räumlich homogen in den Boden eintretenden Wassers kann die unterirdische Abflussrate auch mit (7.2) beschrieben werden:

$$q_{x,y} = r \cdot a \quad (7.2)$$

$r$ : Rate, mit der Wasser in den Bodenspeicher eintritt [ $\text{m h}^{-1}$ ]

$a$ : Fläche pro Höhenlinienlänge, die in den Punkt (x,y) entwässert [m]

Werden (7.1) und (7.2) kombiniert, erhält man Formel (7.3), welche die lokale Tiefe des Grundwasserspiegels  $D_{x,y}$  [m] mit dem sogenannten Topographischen Index,  $\ln(a/\tan \beta)$ , den Parame-

tern  $m$  und  $T_0$  sowie der Eintrittsrate von Niederschlagswasser in den Grundwasserspeicher verknüpft:

$$D_{x,y} = -m \cdot \ln\left(\frac{r \cdot a}{T_0 \cdot \tan \beta}\right) \quad (7.3)$$

$D_{x,y}$  beträgt 0, wenn der Boden am Punkt  $(x,y)$  bis zur Oberfläche mit Wasser gesättigt ist. Trocknet der Boden und fällt der Grundwasserspiegel, werden die Werte für  $D_{x,y}$  positiv.

Wenn (7.3) über das gesamte Einzugsgebiet integriert (bzw. über alle Rasterzellen summiert) wird, erhält man das durchschnittliche Speicherdefizit des Einzugsgebiets,  $\bar{D}$ . Schliesslich kann das Speicherdefizit auf Einzugsgebietsebene mit dem lokalen Speicherdefizit  $D_{x,y}$  verknüpft werden. Unter Annahme räumlich konstanter Werte für  $T_0$  folgt:

$$D_{x,y} = \bar{D} + m \left[ \lambda - \ln \frac{a}{\tan \beta} \right] \quad (7.4)$$

$\lambda$ : Mittelwert des Topographischen Index im Einzugsgebiet []

(7.4) verbindet über den Topographischen Index das Speicherdefizit des gesamten Einzugsgebiets mit dem Speicherdefizit an einem Punkt im Einzugsgebiet. Der Topographische Index operationalisiert dabei die Wahrscheinlichkeit, dass ein Punkt wassergesättigt und somit Teil der Beitragenden Fläche wird. Punkte mit hohen Werten des Topographischen Index verfügen über eine grosse entwässernde Fläche und/oder über eine geringe Hangneigung. Beide Faktoren zusammen bewirken, dass sich an diesen Punkten tendentiell Wasser sammelt.

Nimmt der lokale Topographische Index einen Schwellenwert von

$$x(\bar{D}) = \lambda + \frac{\bar{D}}{m} \quad (7.5)$$

an, so verschwindet das lokale Speicherdefizit  $D_{x,y}$  in (7.4), d. h. das Flächenelement am Punkt  $(x,y)$  ist mit Wasser gesättigt und also Teil der Beitragenden Fläche. "The value of  $x$  and hence the contributing area vary dynamically in relation to changes in the mean catchment deficit, which in turn reflects the catchment water balance for the saturated zone" (Brasington und Richards 1998: 301). Aus der Grösse der aktuellen Beitragenden Fläche und der aktuellen Nieder-

schlagsintensität kann dann der oberirdische Abfluss in einem Zeitschritt direkt berechnet werden.

(7.4) impliziert, dass Punkte mit ähnlichen Werten des Topographischen Index,  $\ln(a/\tan \beta)$ , sich in der Modellierung hydrologisch ähnlich verhalten (Beven 2001a: 210). Aus diesem Grund ist es in der Modellierung nicht nötig, Berechnungen für jeden Punkt (jede Rasterzelle) im Einzugsgebiet einzeln durchzuführen. In TOPMODEL werden die hydrologischen Berechnungen auf einzelnen Klassen des Topographischen Index durchgeführt.

Um die aktuelle Beitragende Fläche zu eruieren, muss über die gesamte Modellierung die Wasserbilanz auf Einzugsgebietsebene nachgeführt werden. Dies geschieht mittels der hydrologischen Kontinuitätsgleichung (7.6).

$$\bar{D}(t+1) = \bar{D}(t) + \frac{Q_b(t) - Q_v(t)}{A} \cdot \Delta t \quad (7.6)$$

$Q_b$ : Basisabflussrate aus der gesättigten Zone [ $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$ ]

$Q_v$ : Vertikale Flussrate aus der ungesättigten Zone in die gesättigte Zone [ $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$ ]

A: Fläche des Einzugsgebiets [ $\text{m}^2$ ]

$\Delta t$ : Zeit [h]

### 7.2.2. Modellierung der gesättigten Zone

Dem Grundwasser der gesättigten Zone entspringt der Basisabfluss mit der Rate  $Q_b$ . In TOPMODEL wird für dessen Modellierung die einfachste Form eines exponentiellen Speichers verwendet:

$$Q_b = Q_0 \cdot \exp(-\bar{D}/m) \quad (7.7)$$

$Q_0$ : Flussrate aus der gesättigten Zone wenn  $\bar{D} = 0$  [ $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$ ]

$Q_0$  wird gemäss folgender Formel berechnet:

$$Q_0 = A \cdot \exp(-\lambda) \quad (7.8)$$

A: Fläche des Einzugsgebiets [ $\text{m}^2$ ]

### 7.2.3. Modellierung der Wurzelzone und der ungesättigten Zone

Dem Speicher der Wurzelzone wird Wasser durch Evapotranspiration entzogen. Erst wenn der Speicher der Wurzelzone gefüllt ist, gelangt Wasser in die ungesättigte Zone. Um die Anzahl nötiger Parameter möglichst gering zu halten, berechnet TOPMODEL die reelle Evapotranspiration auf Basis der potentiellen Evapotranspiration und dem Quotienten aus dem aktuellen Speicherniveau und der maximalen Speicherkapazität der Wurzelzone.

Der vertikale Fluss in der bzw. aus der ungesättigten Zone,  $Q_v$ , wird wiederum auf den einzelnen Klassen des Topographischen Index berechnet. Er ist abhängig vom Speicherstand der ungesättigten Zone und von der Tiefe des Grundwasserspiegels, repräsentiert durch die Obergrenze der gesättigten Zone.

## 7.3. Forschungsstand

Zur Frage der Sensitivität von TOPMODEL auf verschiedene Auflösungen von DTM wurden schon diverse Untersuchungen publiziert. Im folgenden Abschnitt wird zuerst auf die auflösungsbezogene Sensitivität der wichtigsten Eingangsgrösse in TOPMODEL, des Topographischen Index, eingegangen. Anschliessend wird der Forschungsstand bezüglich der Sensitivität der Modellierungen an sich aufgezeigt. Es folgt ein Abschnitt, in dem die Kalibrierung einzelner Modellparameter und deren kompensierende Wirkung in bezug auf auflösungsinduzierte Modellierungsunterschiede geschildert werden. Im vierten Abschnitt wird speziell auf die Untersuchung von Lane et al. (2004) eingegangen, die erstmals TOPMODEL mit hochaufgelösten LIDAR-Daten verwendet haben. Es folgt eine Zusammenfassung mit einer Übersicht über die in bisherigen Untersuchungen verwendeten Datenquellen und Auflösungen der DTM.

### 7.3.1. Sensitivität des Topographischen Index

Als einige der ersten untersuchen Zhang und Montgomery (1994) die Auswirkungen verschieden aufgelöster DTM auf TOPMODEL. Die durchschnittliche Hangneigung der von ihnen untersuchten Einzugsgebiete sinkt mit zunehmender Rasterzellengrösse. Aber „the distributions for both catchments suggest that grid sizes smaller than 10 m yield only marginal improvement in slope representation“ (Zhang und Montgomery 1994: 1021). Grössere Zellgrössen führen zu im Durchschnitt grösseren entwässernden Flächen. Zhang und Montgomery sehen den Grund dafür darin, dass mit dem verwendeten Fliessrichtungs-Algorithmus die Fläche einer Rasterzelle den Minimalwert für die entwässernde Fläche jeden Punkts bestimmt. Die Kombination von Hang-

neigung und entwässernder Fläche, inklusive der inhärenten Verzerrungen bei unterschiedlichen Zellgrößen, findet sich im Topographischen Index wieder. Kleinere Zellgrößen führen bei Zhang und Montgomery zu kleineren Werten des Topographischen Index. „The influence of grid size on both mean and local values of  $a/\tan \beta$  demonstrates the potential for affecting topographically based hydrologic models based on this parameter” (Zhang und Montgomery 1994: 1021f). Als noch stärker beurteilen Zhang und Montgomery die Auswirkungen verschiedener Auflösungen auf die räumliche Verteilung des Topographischen Index. Bei größerer Auflösung verschwinden Details sowohl des Flussnetzes als auch der trockeneren Hänge. Auch Wolock und Price (1994: 3044) stellen in ihrer Untersuchung fest, dass das räumliche Muster des Topographischen Index für feine Auflösungen wesentlich komplexer und „dendritischer“ ist als für gröbere Auflösungen. Für die statistische Verteilung finden sie ähnlich wie Zhang und Montgomery (1994), dass gröbere Auflösung mit höheren minimalen und mittleren Werten des Topographischen Index verbunden ist. Bruneau et al. (1995) finden wie Zhang und Montgomery (1994) und Wolock und Price (1994) eine Verschiebung des mittleren Topographischen Index zu höheren Werten, wenn die Rasterzellengröße zunimmt. Zusätzlich machen sie aber auch Veränderungen in der Form der Verteilung des Topographischen Index aus. „This non-linear effect of space resolution may be due to differing effects on the two variables [slope, drainage area per unit contour length] used in determining the topographic index“ (Bruneau et al. 1995: 74).

### **7.3.2. Sensitivität der Modellierung**

Zur Vereinfachung berechneten Zhang und Montgomery (1994) in ihrer Untersuchung lediglich die Abflussgenerierung, nicht aber das Routing der Abflussmengen innerhalb des Einzugsgebiets. Sie finden, dass im allgemeinen die berechneten Spitzenabflüsse mit größerer Auflösung wachsen (1994: 1026). In ihrer weiterführenden Untersuchung konnten Wolock und Price (1994) zeigen, dass sich mit größerer Auflösung die durchschnittliche Tiefe zum Grundwasserspiegel verringerte und sich der Anteil von Oberflächenabfluss am Gesamtabfluss sowie das Maximum des täglichen Abflusses vergrößerten. Mittels einer Sensitivitätsanalyse quantifizieren Wolock und Price (1994) den Einfluss statistischer Parameter der  $\ln(a/\tan \beta)$ -Verteilung auf Modellierungen mit TOPMODEL. Tabelle 9 zeigt eine Zusammenstellung der gefundenen Zusammenhänge.

Tab. 9: Rang-Korrelationskoeffizienten von Modellierungsvariablen mit Parametern der Topographischen Index-Verteilung

Modellierte Variable	Verteilung des Topographischen Index				
	Minimum	Maximum	Mittelwert	Varianz	Schiefe
Tiefe zum Grundwasserspiegel	0.07	-0.04	<b>-0.99</b>	-0.25	-0.05
Anteil Oberflächenabfluss	-0.07	0.07	<b>0.94</b>	<b>0.53</b>	0.17
Mittlerer täglicher Abfluss	0.11	-0.10	0.13	0.43	<b>0.58</b>
Maximaler täglicher Abfluss	-0.09	0.08	<b>0.96</b>	0.45	0.07

Quelle: Darstellung nach Wolock und Price 1994: 3048, Hervorhebungen hinzugefügt

Die Aufstellung zeigt, dass mit Ausnahme des mittleren täglichen Abflusses alle untersuchten hydrologischen Kenngrößen insbesondere sensitiv in Bezug auf den Mittelwert des Topographischen Index reagieren. Wolock und Price (1994) gehen davon aus, dass die Resultate ihrer Studie anders aussehen würden, wären hydraulische Parameter der Modellierung des Basisabflusses vorgängig kalibriert worden. So hätte zum Beispiel ein höherer mittlerer Index-Wert infolge eines gröber aufgelösten DTMs durch einen höheren kalibrierten Wert für die Transmissivität  $T_0$  bzw. die Leitfähigkeit  $K_0$  ( $K_0 \text{ [m h}^{-1}] = T_0 / m$ ) kompensiert werden können. „Therefore if the subsurface hydraulic parameters had been calibrated, the effects of DEM resolution [...] shown in this paper would have been expected to be much less” (Wolock und Price 1994: 3048f).

### 7.3.3. Sensitivität von kalibrierten Modellparametern

Bruneau et al. (1995) griffen die Vermutung von Wolock und Price (1994) auf und kalibrierten in ihrer Analyse die Eingangsparameter von TOPMODEL. Dabei fanden sie, dass  $m$  unabhängig von veränderter Auflösung konstant bleibt. Die kalibrierte hydrologische Leitfähigkeit  $K_0$  hingegen nimmt mit wachsender Zellgröße zu. Damit bestätigte sich die Ansicht von Wolock und Price (1994), die erstmals die kompensierende Wirkung von kalibrierten  $K_0$ -Werten angedeutet haben. „The very high values of downslope conductivity are [...] clearly inconsistent with measurable values of conductivity. Such high values appear to be necessary to scale the predicted saturated areas through the operation of the distribution of the soil topographic index and to induce a sufficiently rapid subsurface response” (Bruneau et al. 1995: 76). Vergleicht man die  $K_0$ -Werte von Bruneau et al. (1995) oder von Franchini et al. (1996; vgl. Tabelle 10) mit gemessenen Werten in der Literatur (Dyck und Peschke 1983: 265, Dingman 2002: 234f, 331) sind erstere tatsächlich deutlich zu gross.



Weiter finden Bruneau et al. (1995), dass der absolute Beitrag an Oberflächenabfluss mit wachsender Zellgröße zunimmt. Dieser ist in TOPMODEL direkt mit der Ausdehnung der gesättigten Fläche verknüpft. Bruneau et al. (1995) betonen, dass alleine die Variationen in den Werten des Topographischen Index dafür verantwortlich sind, dass verschiedene Auflösungen zu unterschiedlich ausgedehnten gesättigten Flächen führen.

Franchini et al. (1996) untersuchten dann die von Bruneau et al. (1995) festgestellte auflösungsbezogene Sensitivität des Modellparameters  $K_0$  vertieft. Sie kalibrierten TOPMODEL mit der Index-Kurve einer bestimmten Auflösung. Unter Konstanthaltung der übrigen derart kalibrierten Parameter wurde dann  $K_0$  für jede Auflösung neu kalibriert. Die resultierenden Werte für  $K_0$  sowie die resultierenden Korrelationskoeffizienten mit der gemessenen Abflussganglinie sind in Tabelle 10 aufgeführt.

Tab. 10: Kalibrierte  $K_0$ -Werte für verschiedene Auflösungen

Auflösung [m]	$K_0$ [m/h]	Korrelationskoeffizient	Mittelwert des Topograph. Index
60	35	0.959	7.31
120	70	0.960	8.01
180	150	0.959	8.60
240	200	0.959	9.01
360	450	0.960	9.77
480	700	0.960	10.18

Quelle: Franchini et al. 1996: 312

Diese Resultate lassen Franchini et al. (1996: 313) eine ähnliche Feststellung wie vor ihnen Bruneau et al. (1995) treffen: “The hydraulic conductivity parameter values show a close link with the grid size of the DEM used to calculate the index curve. (...) this parameter increases with the grid size and, in particular, takes values with no physical correspondence.”

Zusätzlich untersuchten Franchini et al. (1996) die Sensitivität TOPMODELS auf die verwendete Index-Kurve. Dazu berechneten sie den topographischen Index für 20 „fremde“ Einzugsgebiete und verwendeten die gefundenen Verteilungen in ihrem Testgebiet. „The amplitude of the band created by all the index curves is broad; on the other hand, these basins actually present substantial topographic differences (...)“ (Franchini et al. 1996: 310). Die Resultate zeigen eine erstaunlich gute Übereinstimmung der Modellierungsqualität: „These values [Korrelationskoeffizient] are roughly the same, regardless of the index curve used for the simulations. The result is somewhat surprising and shows the model’s manifest lack of sensitivity to the basin’s actual

index curve, given that all these index curves are obtained from DEMs with the same grid size“ (Franchini et al. 1996: 311). Dieses Resultat bekräftigen Franchini et al. (1996) darin, der Schlüssel zur Kompensation von auflösungsinduzierten Modellierungsunterschieden liege nicht in der Form der Index-Verteilung, sondern hauptsächlich in der Lage des Mittelwerts des Topographischen Index. Sie entwickelten deshalb eine Methodik zur Kompensation über  $K_\theta$ , die sich allein auf den mittleren Topographischen Index abstützt. Auf diese Kompensationsmethodik wird im Abschnitt 8.5 genauer eingegangen.

Gestützt auf die Resultate von Franchini et al. (1996) untersuchten Saulnier et al. (1997) die kompensierende Wirkung des Parameters  $K_\theta$ . Saulnier et al. (1997: 1336) weisen ähnlich wie vor ihnen Bruneau et al. (1995) und Franchini et al. (1996) neben der Translation des Mittelwerts auf Veränderungen in der Form der Verteilung des Topographischen Index verschiedener Auflösungen hin. Trotz dieser Unterschiede ist es Saulnier et al. (1997: 1338) mittels Kalibration möglich, mit Index-Kurven aller Auflösungen ähnlich gute Modellierungen zu erhalten. Wie Bruneau et al. (1995) können sie dabei zeigen, dass der Parameter  $K_\theta$  einen deutlichen Anstieg mit gröberer Auflösung zeigt (Saulnier et al. 1997: 1338). Dies ist auch konsistent mit den Überlegungen von Wolock und Price 1994 und mit den Untersuchungen von Franchini et al. 1996. Saulnier et al. (1997) vergleichen die kalibrierten Werte für  $K_\theta$  mit jenen, die nach der Formel von Franchini et al. (1996) ausgehend vom  $K_\theta$ -Wert für die Auflösung von 20 Metern berechnet worden sind. Dabei zeigt sich, dass die kalibrierten  $K_\theta$ -Werte für gröbere Auflösungen in ihrem Untersuchungsgebiet sehr viel stärker ansteigen, als dies die Formel von Franchini et al. (1996) nahelegen würde. „In the Maurets catchment (...) it appears that the change in the shape of the distribution [of the topographic index] may also be important. (...) the mean translation effect is not sufficient to explain the change in calibrated  $K_\theta$  values (...)“ (Saulnier et al. 1997: 1339). Auf Basis dieser Erkenntnisse entwickeln sie eine eigene Kompensationsmethodik, die für  $K_\theta$  Werte liefert, die näher an den kalibrierten liegen.

Brasington und Richards (1998) untersuchten in ihrer Studie unter anderem die Kompensation von Auflösungsunterschieden über  $K_\theta$  gemäss Franchini et al. (1996) und gemäss Saulnier et al. (1997). Dazu verglichen sie für verschiedene Auflösungen berechnete  $K_\theta$ -Werte mit den durch Kalibration erhaltenen Werten. „For resolutions up to 100 m both methods appear reliable estimators of the ‘optimal’ values of  $K_\theta$ , although the method of Franchini and others (1996) tends towards overprediction“ (Brasington und Richards 1998: 310). Für Zellgrößen über 100 Meter unterschätzt der Ansatz von Franchini et al. (1996) die  $K_\theta$ -Werte. Demgegenüber liefert der Ansatz von Saulnier et al. (1997) gute Werte bis zur maximalen untersuchten Auflösung von 500 Metern (vgl. Abbildung 48).

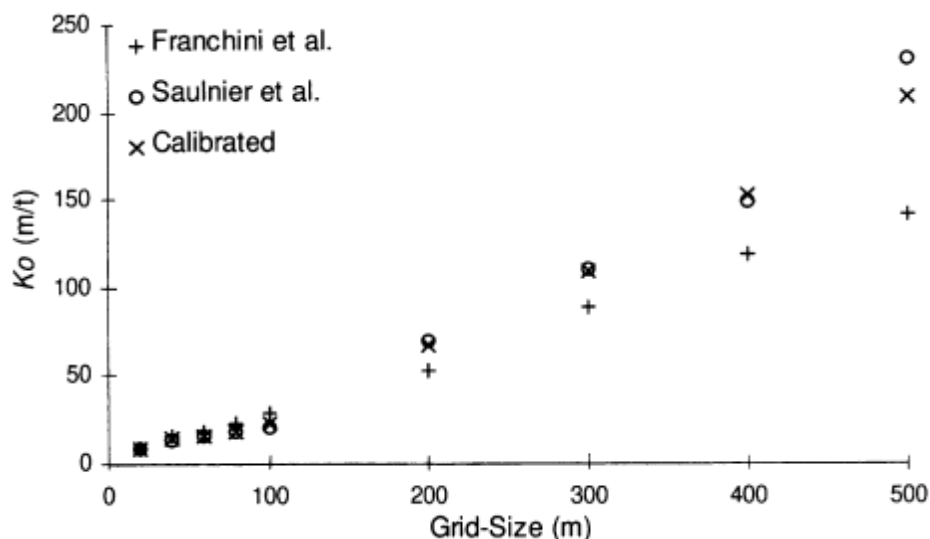


Abb. 48: Geschätzte und kalibrierte Werte für  $K_0$   
Quelle: Brasington und Richards 1998: 311

Higy und Musy (2000) untersuchten ebenfalls die Sensitivität des Parameters  $K_0$  in bezug auf die Auflösung der verwendeten DTM. Auch sie fanden in ihrem Untersuchungsgebiet ein Ansteigen von  $K_0$  mit größer werdender Auflösung. Allerdings weicht das durch Kalibration ermittelte Verhalten der Parameter teilweise ziemlich stark von den Ansätzen gemäss Franchini et al. (1996) und Saulnier et al. (1997) ab. Auf diese offensichtlichen Abweichungen wird in ihrer Untersuchung allerdings nicht genauer eingegangen.

#### 7.3.4. Hochoflösende Daten und TOPMODEL

Lane et al. (2004) verwendeten TOPMODEL erstmals mit hochaufgelösten (2 Meter) LIDAR-Daten. In der Modellierung finden sie grosse gesättigte Flächen im Einzugsgebiet, die aber nicht alle mit dem Flussnetz verbunden sind. „As the rain storm progresses, the number and the extent of these areas increase [...] but, even then, some locations remain unconnected” (Lane et al. 2004: 194). Bei größeren Auflösungen reduzieren sich die Anzahl und die Ausdehnung von nicht mit dem Flussnetz verbundenen gesättigten Flächen. Insgesamt zeigen die Einzugsgebiete kohärentere Muster gesättigter Flächen. Die Problematik isolierter gesättigter Flächen führt bei feinen Auflösungen dazu, dass einige Flächen zu schnell Oberflächenabfluss generieren. Dadurch wird auch die Geschwindigkeit, mit der ein Einzugsgebiet gesättigt wird, beeinflusst. Denn die isolierten gesättigten Flächen wandeln Niederschlag in Oberflächenabfluss um, der ansonsten auf dem Weg zum Flussnetz in ungesättigten Gebieten hätte infiltrieren können.

Um dieser Problematik vorzubeugen, entwickeln Lane et al. (2004) den sogenannten Netzwerk-Index-Ansatz. Dieser kann allerdings nur dann verfolgt werden, wenn ein *Single steepest*

*descent*-Algorithmus verwendet wird. Lane et al. (2004: 197) stützen sich dabei auf Quinn et al. (1991, 1997). Auf Bevens Empfehlung (2001a: 67), für TOPMODEL *Multiple flow direction*-Algorithmen zu verwenden, gehen sie nicht ein. Im Netzwerk-Index-Ansatz kann eine gesättigte Fläche nur Oberflächenabfluss generieren, wenn alle Rasterzellen zwischen ihr und dem Flussnetz ebenfalls gesättigt sind. Lane et al. (2004: 198) räumen ein, dass diese Sichtweise ebenfalls Defizite aufweist: „Ultimately, this treatment can be viewed as one end of a spectrum of two extremes.“ Wenn die Sättigung des Einzugsgebiets steigt, wächst auch die Wahrscheinlichkeit, dass der Netzwerk-Index-Ansatz die Infiltration von Wasser über- und die Generierung von Oberflächenabfluss unterschätzt.

### **7.3.5. Zusammenfassung**

Es wurden von diversen Autorinnen und Autoren Untersuchungen betreffend der Sensitivität von TOPMODEL in bezug auf die Auflösung von DTM durchgeführt. In vielen Untersuchungen wurden von Höhenlinien oder einzelnen Höhenkoten interpolierte DTM verwendet. Als Datenbasis dienten in diesen Fällen oft Papierkarten oder photogrammetrisch abgeleitete Daten. Abbildung 49 zeigt die Ausgangsmassstäbe der in den wichtigsten Untersuchungen verwendeten Eingangsdaten.

In diesem Zusammenhang muss der Begriff der Auflösung von Höhendaten feiner untergliedert werden. Höhendaten in Rasterform haben eine nominelle Auflösung und eine reale. Diese beiden Auflösungen können sich mehr oder weniger decken. Saulnier et al. (1997) leiten ein DTM mit 20 Metern Auflösung von 10 Meter-Höhenlinien im Massstab 1:25'000 ab. Bruneau et al. (1995) taten dasselbe mit Daten des Massstabs 1:10'000 und Brasington und Richards mit 1:5000. Zhang und Montgomery (1994) erstellten ein DTM der Auflösung 2 Meter von einer topographischen Karte im Massstab 1:4800 und Luftbildern, während Lane et al. (2004) für dieselbe Auflösung äusserst dicht erhobene LIDAR-Daten verwenden konnten. Diese Beispiele mögen darauf hinweisen, dass zwei Datensätze mit nominell gleicher Auflösung – beeinflusst durch den Massstab der Ausgangsdaten – die Topographie nicht unbedingt gleich detailliert repräsentieren. Verstärkt werden kann dieser Effekt durch die Verwendung von für den Kartengebrauch allenfalls generalisierten Höheninformationen.

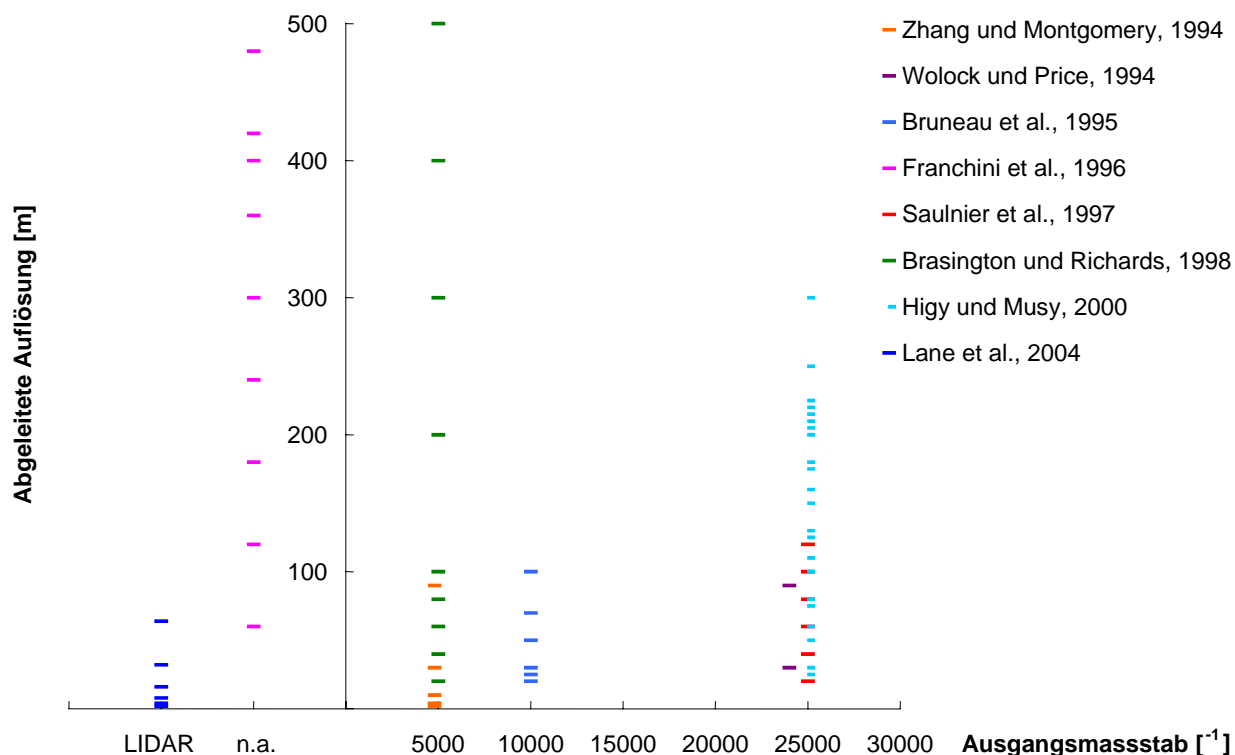


Abb. 49: Verwendete Auflösungen in TOPMODEL-Untersuchungen

Nicht abgebildet ist die Auflösung von 90 Metern, abgeleitet vom Massstab 1:250'000, wie sie Wolock und Price (1994) verwendet haben. Franchini et al. 1996 (Massstab: n. a.) machen keine Angaben über die Herkunft ihrer Höhendaten

## 7.4. Verwendete Geländemodelle

Für die Anwendung von TOPMODEL wurde das Einzugsgebiet des Wüstenbachs, der östlich von Boltigen in die Simme mündet, als Untersuchungsgebiet gewählt.

Die Modellierungen wurden anfänglich mit fünf verschiedenen Auflösungen durchgeführt. Wie in der Untersuchung von Daisyworld wurden die unterschiedlich aufgelösten DTM aus den LIDAR-Punktdaten, die mit einer ungefähren Dichte von 0.7 Punkten/m<sup>2</sup> vorlagen, abgeleitet.

Die DTM für TOPMODEL wurden in den Auflösungen 2.5, 5, 10, 20 und 40 Meter erstellt. Diese Auflösungen sind eine geometrische Reihe. Dadurch werden räumliche Vergleiche zwischen den unterschiedlichen Auflösungen erleichtert. Die Interpolation wurde mittels eines in IDW-Algorithmus (Exponent 2) ausgeführt. Wo möglich wurden die Interpolationsparameter identisch gewählt wie für die DTM der Modellierungen mit Daisyworld im ersten Teil dieser Arbeit (vgl. Tabelle 1, S. 22). Anders als bei den Daisyworld-DTM wurde für TOPMODEL aus

technischen Gründen im DTM der Auflösung 2.5 Meter eine maximale Interpolationsdistanz von 10 Metern vorgegeben.

Tab. 11: Parameter der IDW-Interpolation für TOPMODEL

Auflösung DGM	Anzahl Punkte	Maximale Distanz
2.5 Meter	5	10 Meter
5 Meter	20	10 Meter
10 Meter	70	20 Meter
20 Meter	280	40 Meter
40 Meter	1120	80 Meter

Später wurden die Modellierungen mit TOPMODEL um die Auflösungen von 80 Metern und 160 Metern ergänzt, um einen grösseren Auflösungsbereich abzudecken. Diese beiden DTM wurden direkt mittels bilinearem Resampling in ESRI's ArcGIS aus dem DTM der Auflösung 20 Meter abgeleitet.

## 7.5. Der Topographische Index

Der Topographische Index wird auf der Basis eines hydrologisch korrigierten DTM berechnet. Während der hydrologischen Korrektur werden Senken im DTM (Gebiete ohne Ausfluss) iterativ aufgefüllt. Anschliessend wurden DTM verschiedener Auflösung jeweils auf die Fläche des Einzugsgebiets geclippt. Die Bestimmung der Einzugsgebietsfläche erfolgte dabei in jeder Auflösung neu, so dass sich die Einzugsgebiete zwar sehr gut, aber nicht vollständig decken. Der Ausflusspunkt zur Einzugsgebietsbestimmung musste von Auflösung zu Auflösung jeweils ein wenig verschoben werden, um dasselbe Einzugsgebiet zu erhalten. Die Verschiebungen bewegen sich in begrenztem Rahmen; die grösste Distanz zwischen zwei Ausflusspunkten beträgt circa 30 Meter.

Zur Einzugsgebietsabgrenzung wurde der in ESRI's ArcGIS zur Verfügung stehende D8-Algorithmus verwendet. Dies stellt eine Inkonsistenz mit der Bestimmung der Fliessrichtungen für die Flussakkumulation, wie sie für die Berechnung des Topographischen Index verwendet wird, dar. Jedoch hätte zur Einzugsgebietsabgrenzung mittels des *Multiple flow direction*-Algorithmus von Quinn et al. (1995) eigens eine *Upward routing*-Prozedur geschrieben werden müssen, um zu einem gegebenen Ausflusspunkt das Einzugsgebiet bestimmen zu können. Darauf wurde im Rahmen dieser Untersuchung verzichtet. Es kann davon ausgegangen werden, dass der Einfluss

dieser Inkonsistenz auf die hydrologische Modellierung eher marginal und zudem für alle untersuchten Auflösungen ähnlich ist.

Wie in Abschnitt 7.2.1 erwähnt, wird der Topographische Index am Punkt  $(x,y)$  aus der entwässernden Fläche pro Höhenlinienlänge und dem Tangens der Hangneigung am Punkt  $(x,y)$  berechnet:

$$TI = \ln(a/\tan \beta) \quad (7.9)$$

Einiges Augenmerk ist dabei auf den Fließrichtungsalgorithmus zu richten, der verwendet wird, um die entwässernde Fläche pro Punkt zu ermitteln. Weit verbreitet ist der *Single steepest descent*- oder D8-Algorithmus, wie ihn ESRI in den ArcGIS-Produkten implementiert hat. Dieser Algorithmus produziert aber oft deutliche, linienhafte Artefakte (vgl. Abbildung 50a). Das fließende Wasser bewegt sich gemäss dem D8-Algorithmus in parallelen Kanälen in eine der acht Hauptrichtungen. Wegen der mangelnden Realitätsnähe eignet sich der einfachere D8-Ansatz nur bedingt zur Generierung des Topographischen Index. Die Verwendung dieses Algorithmus durch Zhang und Montgomery sowie Wolock und Price (beide 1994) schmälert deshalb leider etwas den Wert jener Untersuchungen. Die Resultate beider Teams sind aber von späteren Untersuchungen, die der empfohlenen Methodik gefolgt sind, grundsätzlich bestätigt worden (vgl. Bruneau et al. 1995, Saulnier et al. 1997, Brasington und Richards 1998).

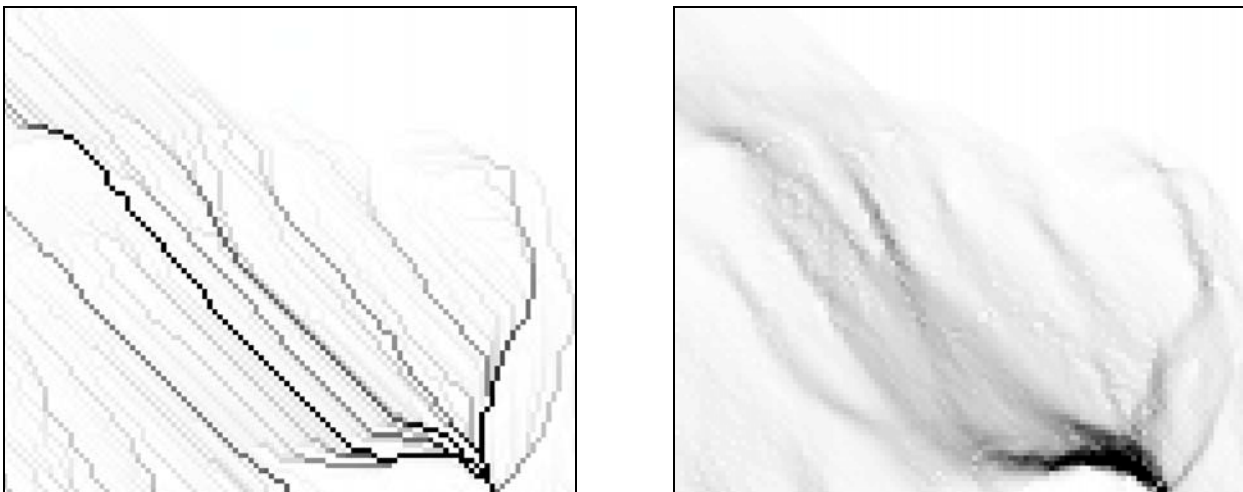


Abb. 50a: Flussakkumulation basierend auf Fließrichtungen gemäss D8

Abb. 50b: Flussakkumulation basierend auf Fließrichtungen gemäss Quinn et al. (1995)

Für die Anwendung von TOPMODEL wird in der Regel (und auch in dieser Untersuchung) der *Multiple flow direction*-Algorithmus von Quinn et al. (1995) verwendet (vgl. Abbildung 50b).

Quinns Algorithmus und der *Resultant vector*-Algorithmus von Tarboton (1997) werden beide von Beven (2001a: 67) empfohlen. Beide Algorithmen verteilen die Wassermenge aus einer Zentralzelle gewichtet an in der Regel mehrere Nachbarzellen (vgl. Abbildung 51b für den Algorithmus nach Quinn).

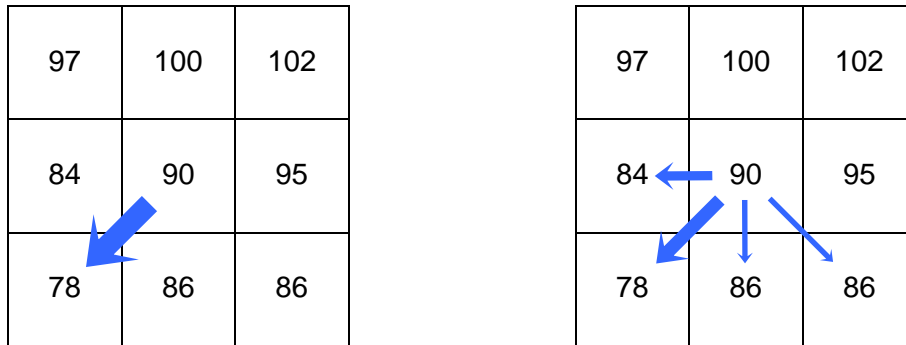


Abb. 51a: *Single steepest descent*-Algorithmus (D8 in ESRI's ArcGIS)  
 Abb. 51b: *Multiple flow direction*-Algorithmus von Quinn et al. (1995)  
 Die Zahlen in den abgebildeten Rasterzellen entsprechen Höhenwerten.  
 Quelle: Abbildung nach Beven 2001a: 67

Auf Bevens (2001b) TOPMODEL-Website ist der FORTRAN-Quellcode eines Programms zur Berechnung des Topographischen Index mithilfe des *Multiple flow direction*-Algorithmus nach Quinn et al. (1995) erhältlich. Es kann auch eine kompilierte VisualBasic-Version des Programms heruntergeladen werden (Beven 2003). Dieses Programm ist aber auf die Berechnung von Rastern mit  $200 \times 200$  Zellen begrenzt.

Aus Gründen der Performanz, der Modularität und der leichteren Anpassbarkeit auf spezifische Bedürfnisse, wurde der Quellcode in Java unter Eclipse neu geschrieben. Anschliessend wurden mit diesem Programm, genannt DTA (*Digital Terrain Analysis*), die Raster des Topographischen Index in den sieben gewählten Auflösungen berechnet und TOPMODEL-kompatible Statistikdateien ausgegeben.

## 7.6. Datensätze Niederschlag und Evapotranspiration

Für den Niederschlag wurde in der Untersuchung ein beispielhafter Datensatz mit 1000 Zeitschritten von jeweils einer Stunde verwendet.

Die Niederschlagsbeiträge schwanken zwischen  $0 \text{ mm h}^{-1}$  und  $7.5 \text{ mm h}^{-1}$ . Der mittlere Niederschlag pro Stunde beträgt  $0.198 \text{ mm}$ . In den 1000 Stunden bzw. circa 42 Tagen fielen insgesamt  $198 \text{ mm}$  Niederschlag. Der Verlauf der Niederschlagsereignisse ist in den Abbildungen im Anhang A3 dargestellt.



Für diese Untersuchung wurden keine potentiellen Evapotranspirationsraten geschätzt. Für die Modellierung mit TOPMODEL wurde deshalb die potentielle Evapotranspiration in jedem Zeitschritt auf 0 gesetzt und so das Evapotranspirationsmodul in der verwendeten TOPMODEL-Software faktisch ausgeschaltet. Aus diesem Grund kommt den Parametern  $SR_{init}$  und  $SR_{max}$  (anfängliches bzw. maximales Speicherniveau der Wurzelzone) nur eine sehr marginale Bedeutung zu. Der Speicher der Wurzelzone wird während des ersten Niederschlagsereignisses linear gefüllt und hat danach mangels Evapotranspiration keinen Einfluss mehr auf die Modellierung.

## 7.7. Ablauf der Modellierungen

Es wurden zwei Modellierungsläufe mit TOPMODEL durchgeführt. In einer ersten Serie erfolgten Modellierungsläufe in den sieben untersuchten Auflösungen mit einem konstant gehaltenen Set der hydrologischen Parameter. Mit einer zweiten Serie von Modellierungsläufen wurde dann die Möglichkeit getestet, auflösungsinduzierte Modellierungsdifferenzen mittels Anpassung des Modellparameters  $K_0$  zu kompensieren. Für diese Korrektur wurde der Ansatz von Franchini et al. (1996) ausgewählt. Er ist wesentlich einfacher durchzuführen als jener von Saulnier et al. (1997) und lieferte in der Untersuchung von Brasington und Richards (1998) bis zu einer Auflösung von 100 Metern etwa gleich gute Ergebnisse. Konstant gehalten wurde dabei der  $K_0$ -Wert von  $20 \text{ m h}^{-1}$  für die Auflösung von 20 Metern. Die  $K_0$ -Werte sowohl für die feineren als auch für die gröberen Auflösungen werden dann mittels der Kompensationsformel gemäss Franchini et al. (1996) angepasst.

Ein grundsätzliches Problem stellte sich bezüglich der Parameterwahl. Im Untersuchungsgebiet sind keine hydrologischen Messreihen vorhanden, so dass TOPMODEL vorgängig zu einer Modellierungsserie nicht mit gemessenen Daten kalibriert werden konnte, um optimale Parameterwerte zu erhalten. Dieser Umstand wurde umgangen, indem repräsentative mittlere Werte für die benötigten Parameter der Literatur entnommen wurden. Die in dieser Untersuchung verwendete TOPMODEL-Version von Beven (2003) benötigt die Parameter  $m$ ,  $\ln(T_0)$ ,  $SR_{max}$ ,  $SR_{init}$  und  $ChVel$ .  $ChVel$  ist die für die Routing-Prozedur verwendete Geschwindigkeit des Wassers in den Fließkanälen. Eine Übersicht über die angenommenen Werte zeigt folgende Aufstellung.

$m$ : 0.032 m

$ChVel$ :  $3600 \text{ m h}^{-1}$

$K_0$ :  $20 \text{ m h}^{-1}$  (20 Meter Auflösung), mit  $K_0 \cdot m = T_0$  wird  $\ln(T_0)$ : -0.446

$SR_{max}$ : 0.05 m

$SR_{init}$  (als Bruchteil von  $SR_{max}$ ): 0

Die einzelnen Parameter beeinflussen natürlich die Modellierung. Allerdings ist mit Ausnahme von  $K_0$  bzw.  $T_0$  kein Parameter in der Lage, Unterschiede, welche in den in Abschnitt 7.3 zitierten Untersuchungen zwischen verschiedenen Auflösungen auftraten, zu verwischen oder wesentlich zu verändern. Diese Modellierungsunterschiede können also auch mit einem angenommenen Parameterset untersucht werden.

## 8. Resultate und Diskussion TOPMODEL

Im den ersten drei Teilen dieses Abschnitts wird auf Unterschiede in den Eingangsgrößen für TOPMODEL eingegangen. Dazu gehören eine statistische Betrachtung der Hangneigungswerte und des Topographischen Index im Einzugsgebiet. Zusätzlich erfolgt eine Analyse der räumlichen Verteilung des Topographischen Index. Im darauffolgenden Abschnitt wird auf die Abflussganglinien als Resultate der Modellierungen ohne Kompensation eingegangen. Die Gründe für auftretende Unterschiede werden analysiert. Schliesslich folgt nach einem erläuternden Abschnitt zum Ansatz von Franchini et al. (1996) die Untersuchung der mit Kompensation modellierten Abflussganglinien. Darin werden die unkorrigierten mit den gemäss Franchini et al. (1996) korrigierten Resultaten verglichen. Schliesslich wird in einem letzten Abschnitt noch kurz auf andere Modellierungsgrößen und deren Schwankungen in verschiedenen Auflösungen ohne und mit angewandter Korrektur eingegangen.

### 8.1. Statistische Verteilung der Hangneigung

Abbildung 52 unten zeigt einige statistische Lage- und Verteilungsparameter der Hangneigung im Untersuchungsgebiet. Auffallend ist das stete Sinken der maximalen Hangneigung mit gröberer Auflösung. Beträgt die maximale Neigung für die Auflösung von 2.5 Metern noch  $88^\circ$ , reduziert sich diese in der grössten untersuchten Auflösung von 160 Metern auf nur noch  $48^\circ$ .

Weniger dramatisch sind die Veränderungen der minimalen Hangneigungswerte. Hier fällt lediglich auf, dass für die Auflösungen von 80 und 160 Metern keine ebenen Gebiete mehr repräsentiert werden.

In der Folge geringerer Spannweiten der Hangneignungsverteilung ist die Standardabweichung für die gröberen Auflösungen geringer. Sie sinkt von  $14^\circ$  für 2.5 Meter auf  $10^\circ$  für 160 Meter.

Anhand der Verteilung der Hangneigungswerte (vgl. Abbildungen 53 und 54) ist ersichtlich, dass das für gröbere Auflösungen beobachtete Absinken der mittleren Hangneigung (von  $30^\circ$  für 2.5 Meter auf  $23^\circ$  für 160 Meter) vor allem durch das Verschwinden der sehr steilen zugunsten weniger steiler Hänge verursacht wird. Bei den flacheren Hängen dominieren die gröberen Auflösungen. Bei ungefähr  $30^\circ$  invertiert sich die relative Lage der Verteilungen und die feineren Auflösungen dominieren.

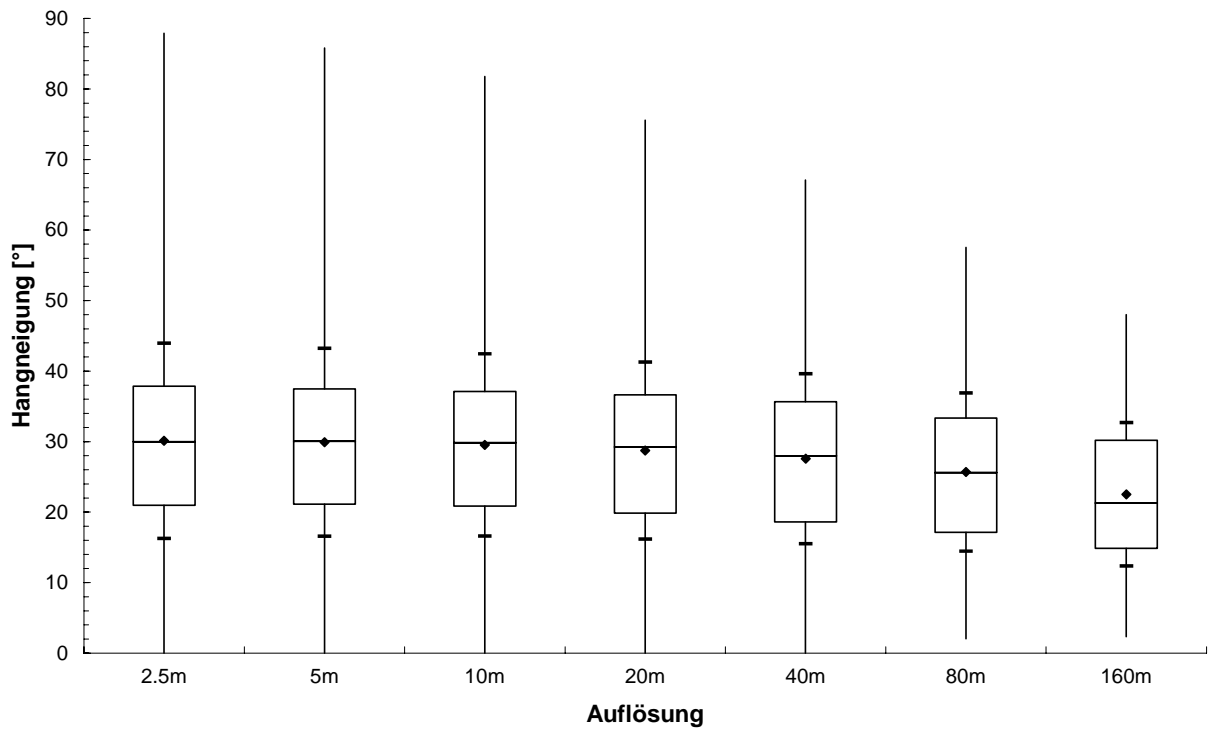


Abb. 52: Box-Whisker-Plot der Hangneigung

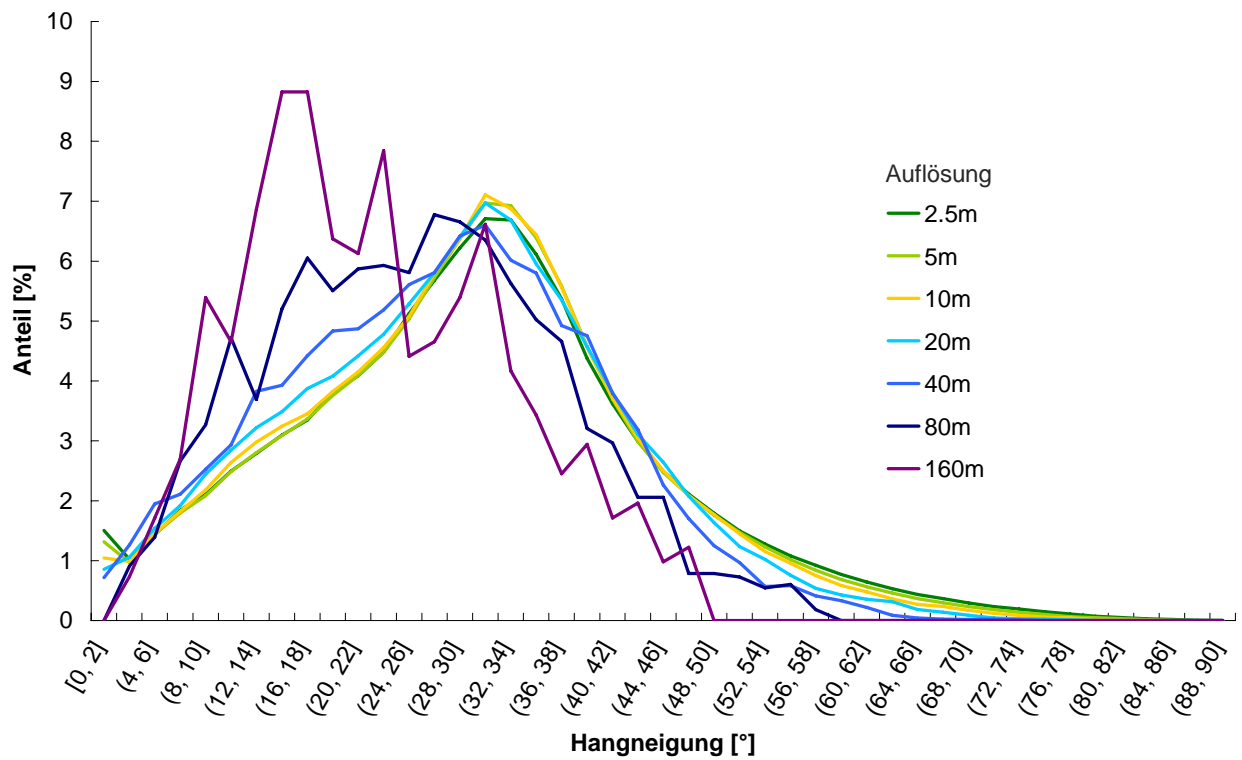


Abb. 53: Verteilung der Hangneigung

Interessanterweise liegen die Verteilungsfunktionen der Auflösungen 2.5 bis 20 Meter ziemlich nahe beieinander. Die Hangneigungswerte in der Auflösung 40 Meter zeigen schon beachtliche Abweichungen, die noch gröber aufgelösten DTM liefern deutlich unterschiedliche Verteilungskurven. Dies deutet darauf hin, dass irgendwo um die Auflösung 40 Meter ein Bruch in der Repräsentation des Geländes erfolgt. Offensichtlich unterscheiden sich die von den DTM mit Auflösungen von 80 und 160 Metern repräsentierten Topographien deutlich von jenen der feineren Auflösungen.

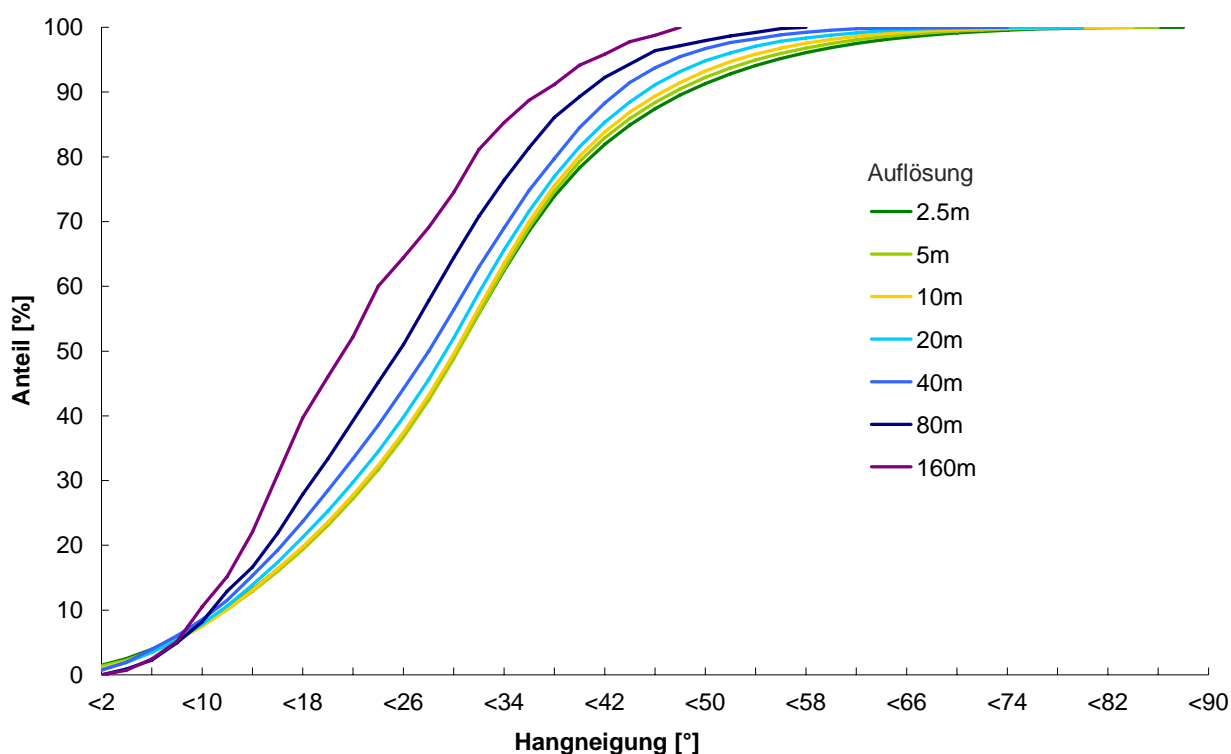


Abb. 54: Kumulative Verteilung der Hangneigung

## 8.2. Statistische Verteilung des Topographischen Index

Aus Abbildung 55 ist ersichtlich, dass der maximale Wert des Topographischen Index für die vier feinstaufgelösten DTM kontinuierlich mit der Rasterzellengröße steigt. Für die Auflösungen 40, 80 und 160 Meter zeigt er dann ein nichtlineares Verhalten. Demgegenüber steigt der minimale Topographische Index-Wert mit gröber werdender Auflösung stetig steil an, von -3.06 für 2.5 Meter auf 4.54 für 160 Meter Auflösung. Ein gleichermassen stetiger – wenn auch weniger steiler Anstieg – wird für den Mittelwert verzeichnet. Dieser scheint vor allem durch den Anstieg bei den tieferen Index-Werten beeinflusst zu sein.

Erstaunlicherweise verzeichnen die gröbsten Auflösungen trotz geringerer Spannweiten eine leicht höhere Standardabweichung als die Datensätze feinerer Auflösung. Dies deutet auf eine Polarisierung der Index-Werte am oberen und unteren Ende der Spannweite hin.

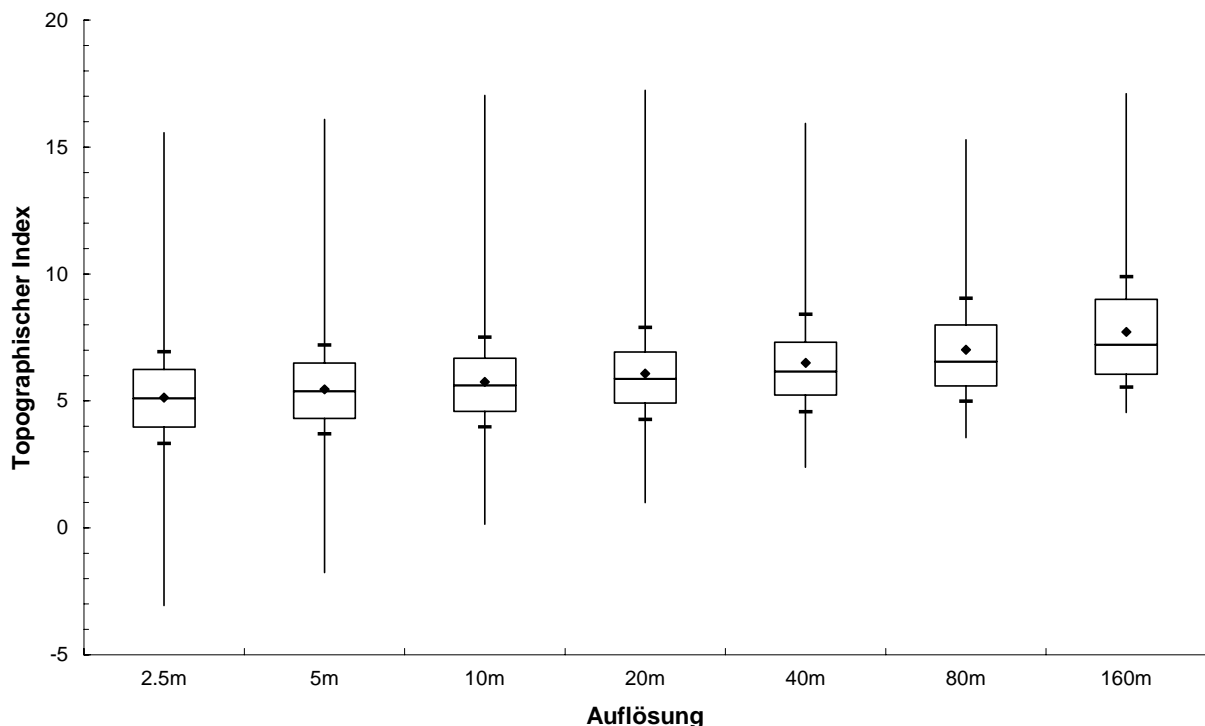


Abb. 55: Box-Whisker-Plot des Topographischen Index

Für die Verwendung in TOPMODEL wird die Verteilungsfunktion des Topographischen Index diskretisiert. Die verwendete TOPMODEL-Version von Beven (2003) kann 29 Index-Klassen verarbeiten. Diese Kapazität wurde denn auch im Java-Programm *DTA* ausgenutzt. Die Abbildung 56 zeigt die in jeweils gleich grosse Intervalle diskretisierten Verteilungsfunktionen des Topographischen Index für die Auflösungen 2.5, 5, 10, 20, 40, 80 und 160 Meter.

Die Auflösungen von 40, 80 und 160 Metern dominieren klar bei den hohen Index-Werten – auch wenn die Maximalwerte bei diesen drei Auflösungen zum Teil tiefer ausfallen als jene feinerer Auflösungen. Auf der anderen Seite fällt der minimale Topographische Index-Wert umso tiefer aus, je feiner die Auflösung des DTM ist, auf dem dieser berechnet worden ist.

Die Verteilungsfunktionen des Topographischen Index insbesondere für grobe Auflösungen verhalten sich fast spiegelbildlich zu den Verteilungsfunktionen der Hangneigung. Die Dominanz der groben Auflösungen bei tiefen Hangneigungswerten und deren Untervertretung bei hohen Hangneigungswerten steuern auch die Verteilung des Topographischen Index. Weiter fällt auf, dass die Verteilungsfunktionen der Auflösungen 2.5 bis 20 Meter – in Analogie zur Hangneigung – sehr ähnlich sind. Die Verteilungen der Auflösungen 40, 80 und 160 Meter unterschei-

den sich demgegenüber recht deutlich sowohl untereinander als auch von den Verteilungen mit feineren Auflösungen.

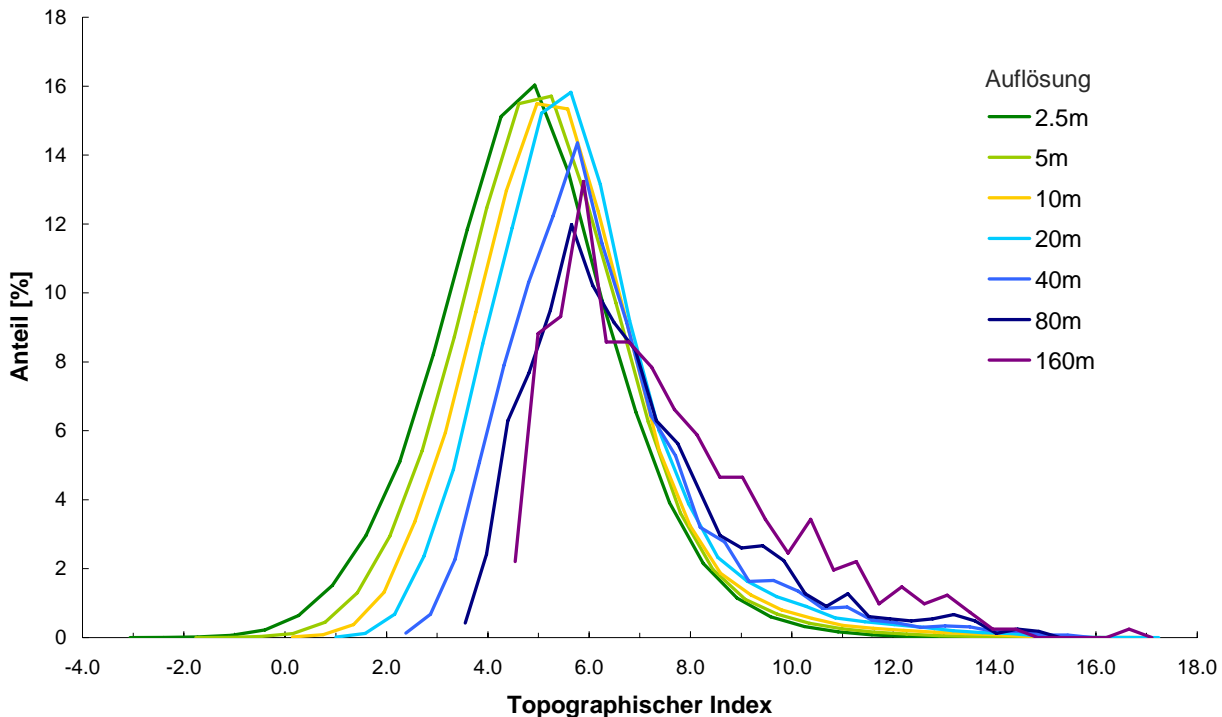


Abb. 56: Diskretisierte Verteilung des Topographischen Index

Der Topographische Index weist in den Auflösungen 2.5 und 5 Meter negative Minimalwerte (-3.06 bzw. -1.76) auf. Der minimale Topographische Index für die Auflösung von 10 Metern ist mit 0.14 dann schon leicht positiv. In den im Abschnitt 7.3 aufgeführten Untersuchungen kamen, soweit bekannt, keine negativen Werte für den Topographischen Index zustande. Dieser Umstand rührt daher, dass in jenen Untersuchungen entweder die nominelle oder die reale Auflösung der Höhendaten zu gering war um genügend kleine entwässernde Flächen bzw. genügend grosse Hangneigungswerte zu erhalten. Daneben verfügt das hier gewählte Untersuchungsgebiet über eine relativ ausgeprägte Topographie. Holko und Lepistö (1997) wendeten TOPMODEL auf ein Gebirgseinzugsgebiet mit einer mittleren Hangneigung von  $28^\circ$  an. Sie verwendeten aber ein DTM der Auflösung 100 Meter und es ist daher nicht davon auszugehen, dass negative Index-Werte resultierten (Angaben bezüglich der Index-Verteilung machen sie keine).

Ein Wert von 0 für den Topographischen Index kommt zustande, wenn gilt:

$$\ln(a/\tan \beta) = 0 \Leftrightarrow a/\tan \beta = 1 \Leftrightarrow a = \tan \beta \Leftrightarrow \arctan a = \beta \quad (8.1)$$

In Abbildung 57 wird die kritische Hangneigung, für die  $\ln(a/\tan \beta) = 0$  ist, in Abhängigkeit von der entwässernden Fläche (ausgedrückt als Vielfaches der Zellenfläche) ermittelt. Zellen mit kleiner entwässernder Fläche weisen mit wesentlich grösserer Wahrscheinlichkeit einen negativen Topographischen Index auf. Demzufolge neigen Raster mit kleinerer Zellgrösse allein wegen der Möglichkeit kleiner entwässernder Flächen stärker dazu, negative Index-Werte zu entwickeln, als solche mit grösserer Zellgrösse. Diese Tatsache, zusammen mit dem Umstand, dass die feineren Auflösungen absolut höhere und anteilmässig mehr grosse Hangneigungen aufweisen, führt dazu, dass die Gesamtwahrscheinlichkeit für feinere Auflösungen, negative Index-Werte zu entwickeln, wesentlich erhöht ist. Die feinsten Auflösungen (2.5 bzw. 5 Meter) weisen in dieser Untersuchung denn auch als einzige negative Index-Werte auf.

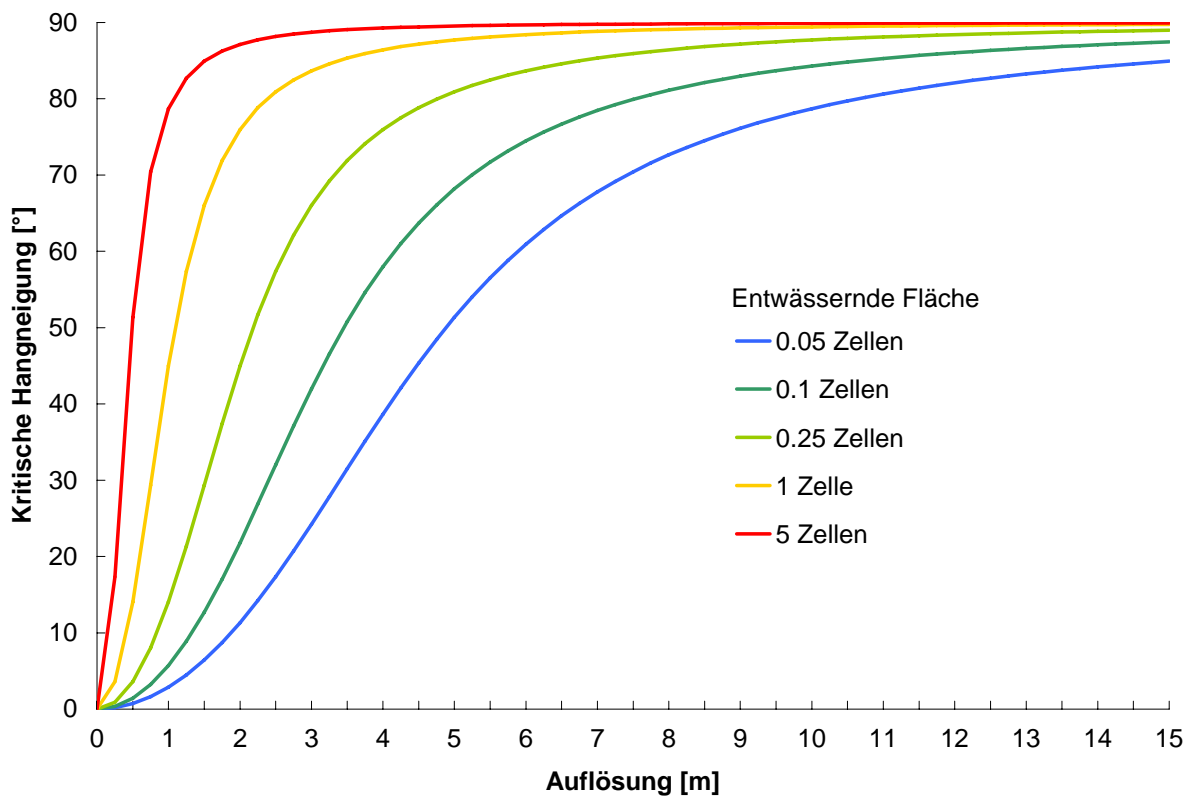


Abb. 57: Schwellenwerte der Hangneigung für negative Werte des Topographischen Index  
Lesebeispiel: Die blaue Kurve zeigt den Verlauf der kritischen Hangneigung für den Fall, dass in die betrachtete Rasterzelle eine Fläche von 5% der Zellfläche entwässert.



### 8.3. Räumliche Verteilung des Topographischen Index

Die räumliche Verteilung des Topographischen Index variiert erwartungsgemäss stark über die untersuchten Auflösungen. Die Abbildungen 58a bis g auf den folgenden Seiten zeigen schattier- te dreidimensionale Darstellungen des Topographischen Index im Untersuchungsgebiet.

Bei den feineren Auflösungen ist das räumliche Muster des Topographischen Index, wie schon Wolock und Price (1994) in ihrer Untersuchung feststellten, sehr fein verästelt. Auch kleinere morphologische Einheiten, wie zum Beispiel sehr feine Kerbtäler in den Hängen oder breitere Fliessrinnen, die in der feinsten Auflösung von 2.5 Metern repräsentiert werden können, erhalten zum Teil hohe Werte für den Topographischen Index. Mit gröberen Auflösungen verschwinden die dendritischen Strukturen immer mehr. In der Auflösung von 20 Metern weisen nur noch mittelgrosse Geländeeinschnitte und Täler hohe Index-Werte auf. In den gröbsten Auflösungen (80 und 160 Meter) erhalten noch das grosse Haupttal und einige sehr prononcierte Geländeein- schnitte hohe Index-Werte.

In einigen Auflösungen enthält das Raster des Topographischen Index kleine Gebiete ohne Da- ten. Bei diesen Gebieten handelt es sich um Senken.

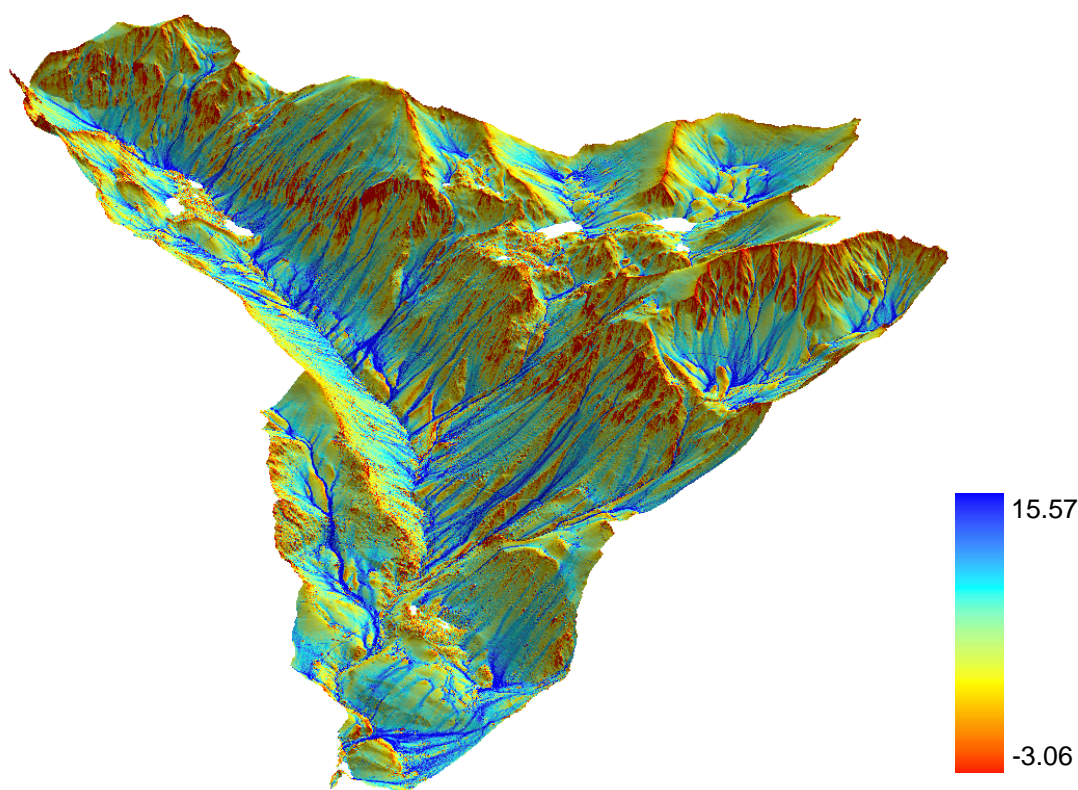


Abb. 58a: Topographischer Index der Auflösung 2.5 Meter

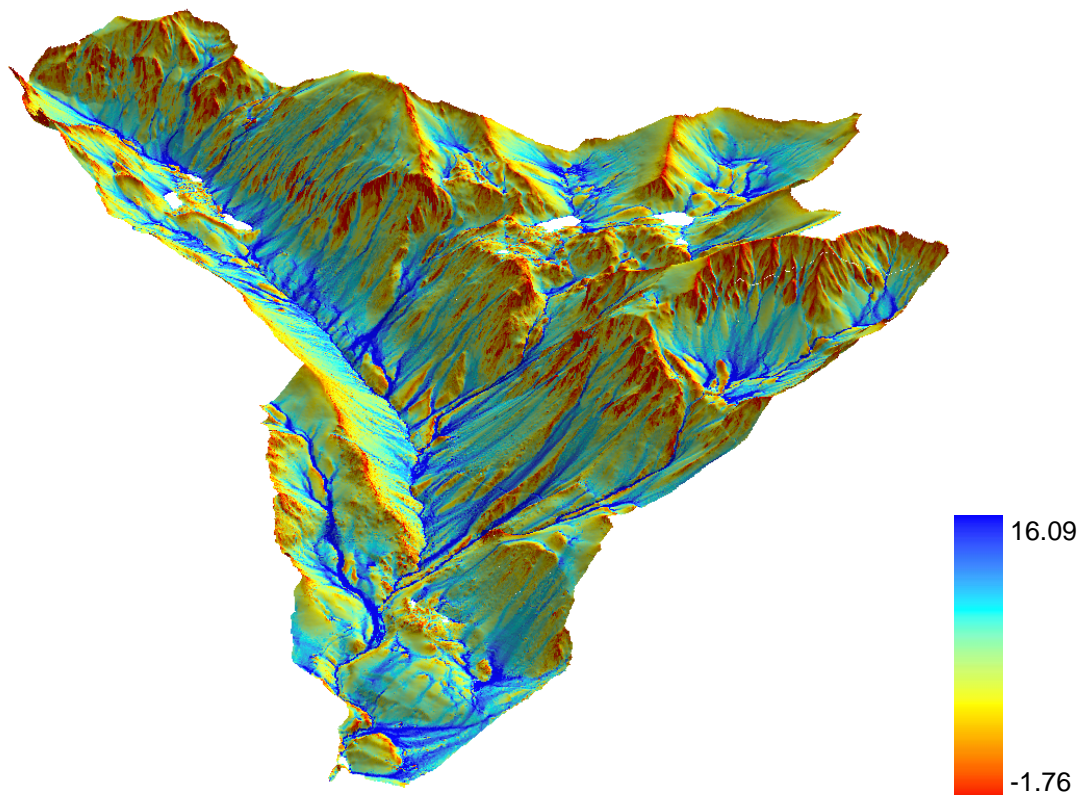


Abb. 58b: Topographischer Index der Auflösung 5 Meter

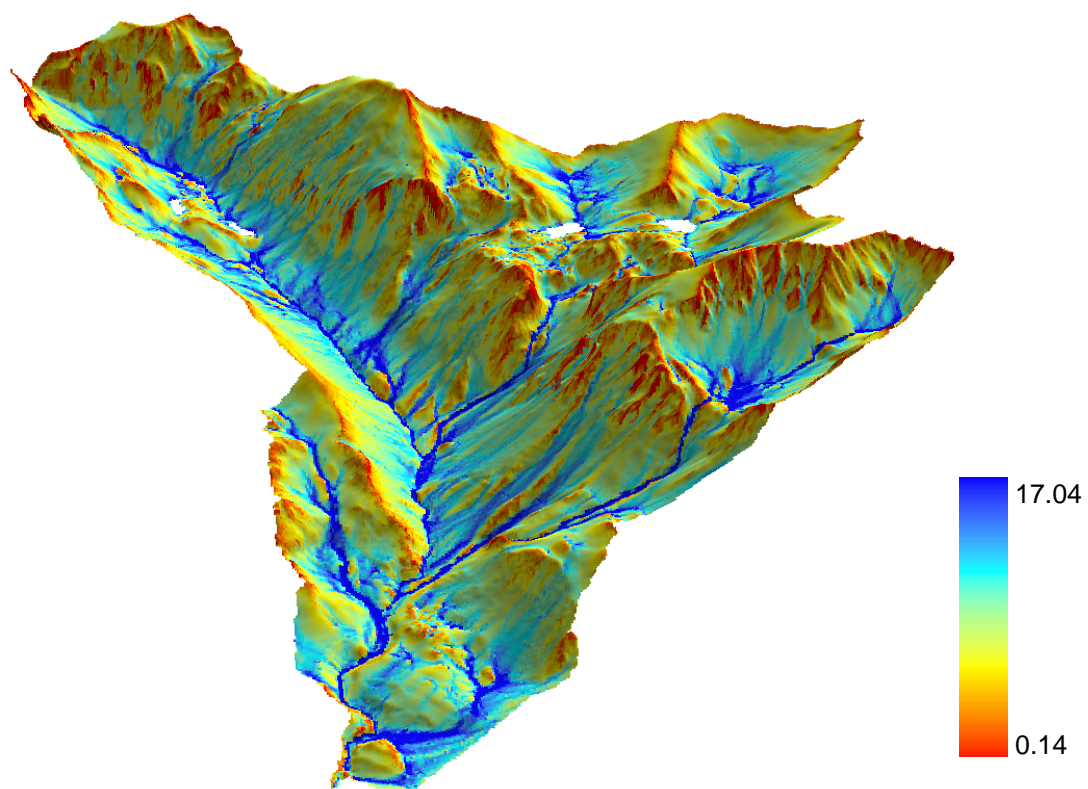


Abb. 58c: Topographischer Index der Auflösung 10 Meter

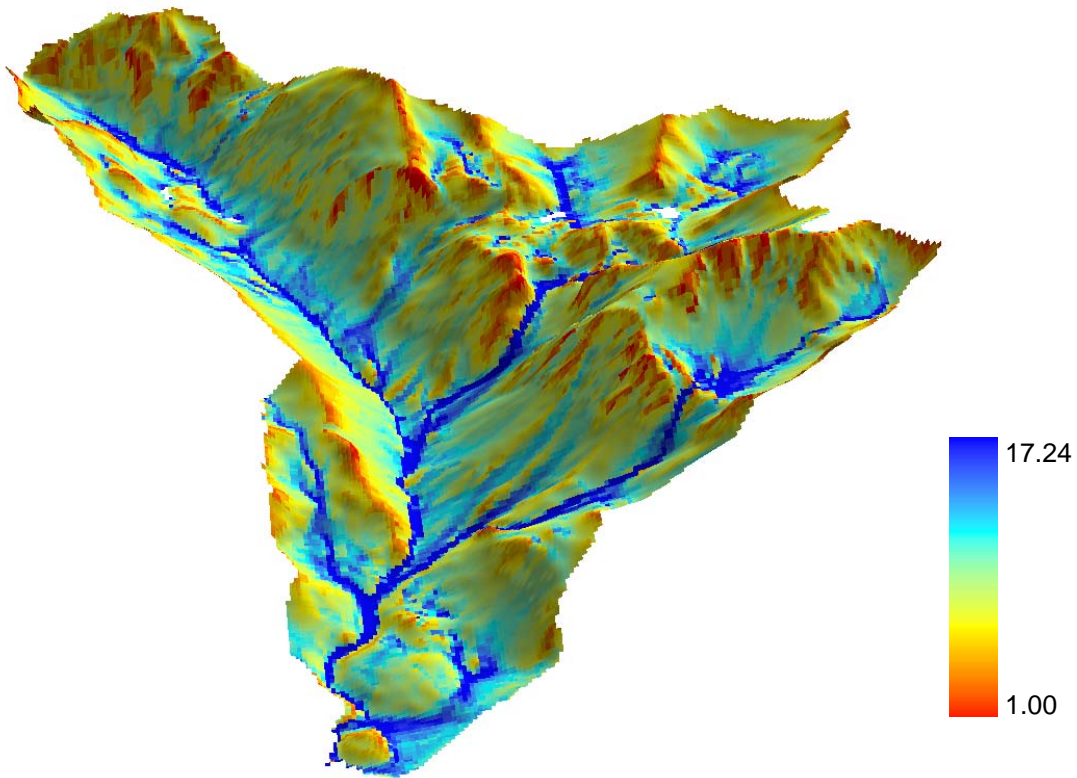


Abb. 58d: Topographischer Index der Auflösung 20 Meter

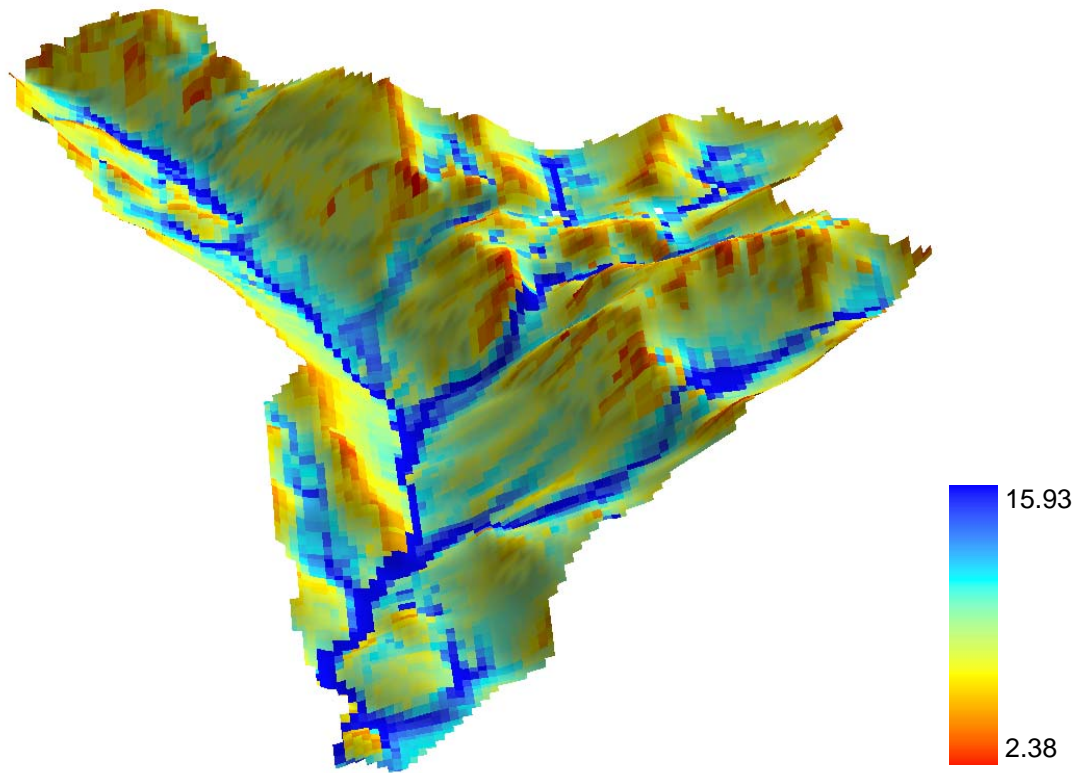


Abb. 58e: Topographischer Index der Auflösung 40 Meter



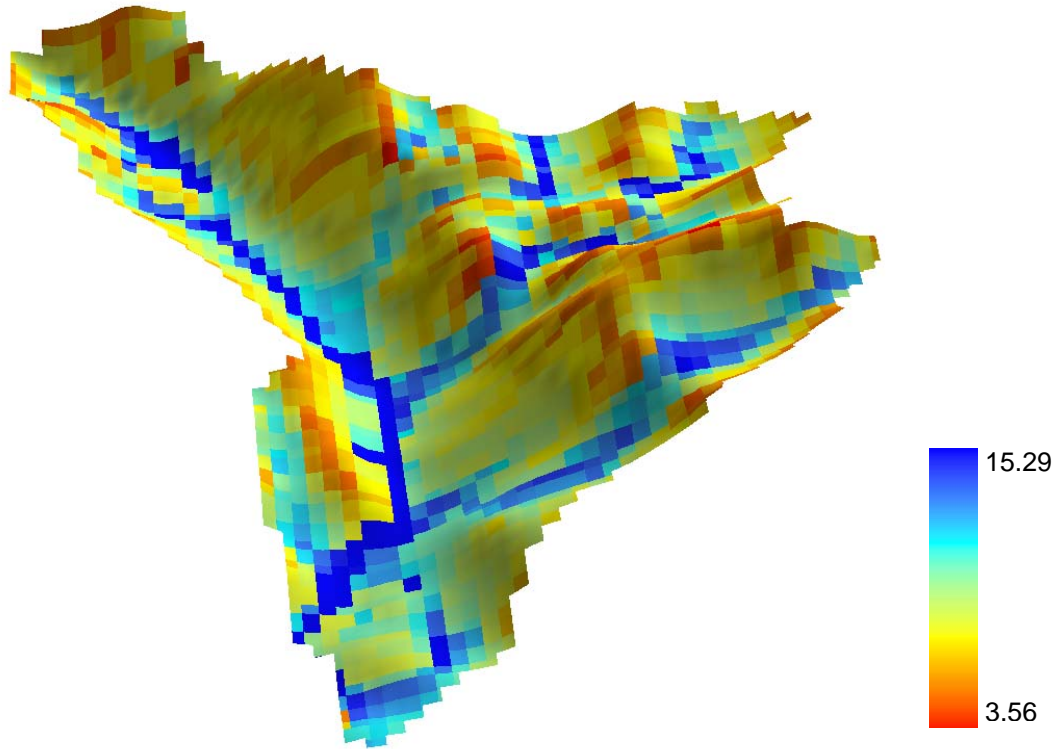


Abb. 58f: Topographischer Index der Auflösung 80 Meter

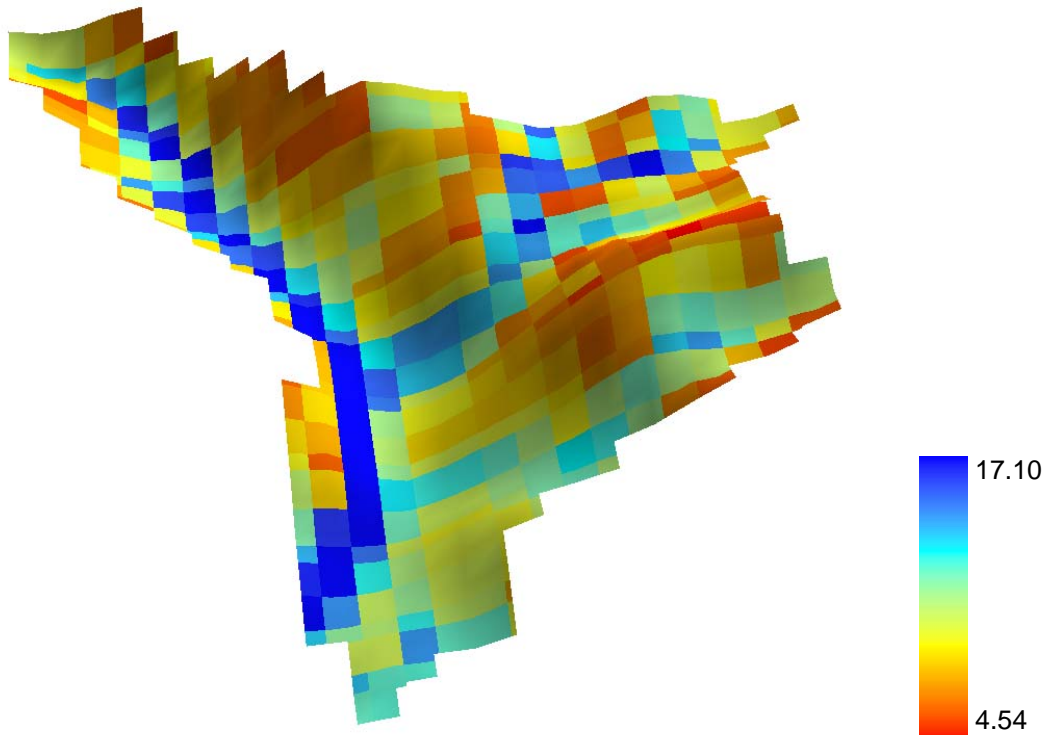


Abb. 58g: Topographischer Index der Auflösung 160 Meter

## 8.4. Modellerte Abflussganglinien

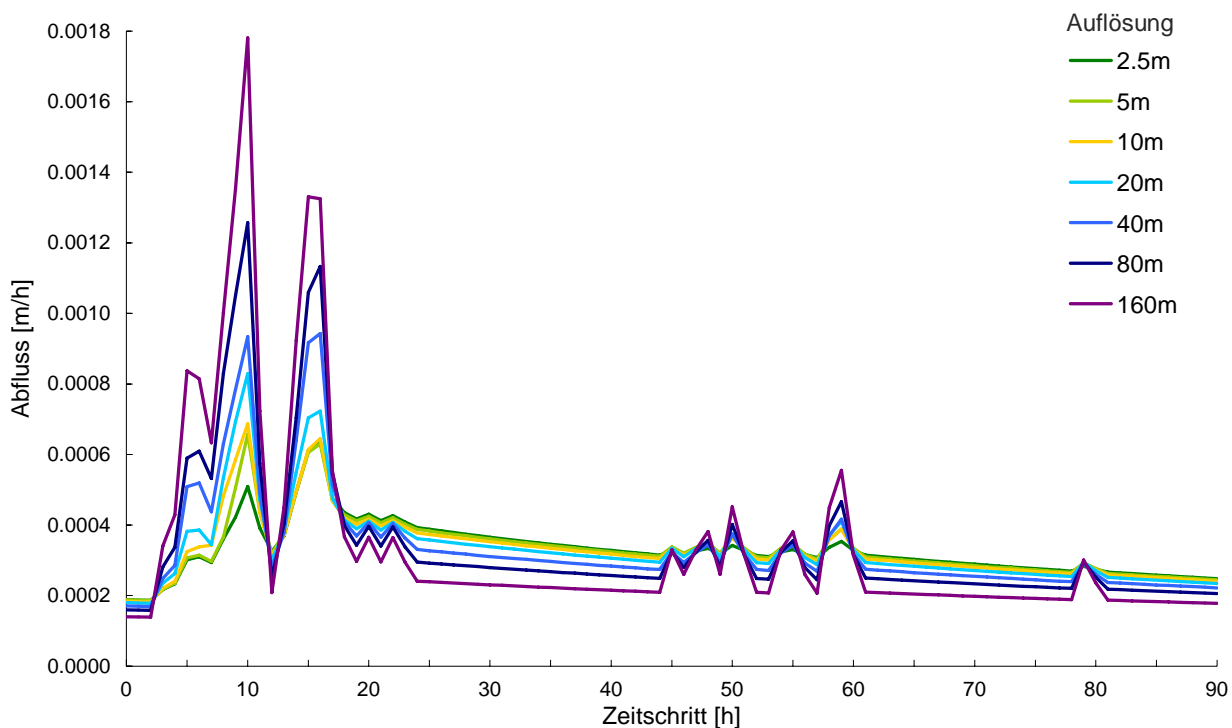


Abb. 59: Abflussganglinien über 90 Stunden

Die vollständigen Ganglinien über alle 1000 Zeitschritte sind im Anhang A4 abgebildet. Abbildung 59 zeigt einen exemplarischen 90-stündigen Ausschnitt aus den in verschiedenen Auflösungen modellierten Abflussganglinien. Diese Ganglinien des Modellierungslaufs ohne jegliche Kompensation über  $K_0$  zeigen zwischen den verwendeten Auflösungen deutliche Unterschiede. Je gröber die Auflösung, desto höher sind in der Regel die Abflussspitzen. Die Rezession der Ganglinien hingegen verläuft bei gröberen Auflösungen schneller/früher als bei den feineren Auflösungen. In der Rezessionsphase haben deshalb für einen betrachteten Zeitschritt die feineren Auflösungen in der Regel die höheren Abflusswerte.

Die Formel für  $Q_0$  (7.8, S. 76) liefert Anhaltspunkte für die unterschiedlichen Mengen von Basisabfluss für unterschiedliche Auflösungen. Die für gröbere Auflösungen beobachtete Translation der Verteilung des Topographischen Index hin zu höheren Werten führt zu einem höheren Index-Mittelwert und mit (7.8) zu einem reduzierten Basisabfluss. Franchini et al. (1996: 319) formulieren dazu eine Anschauung anhand der Hangneigung: „[...] in fact, the gradient of the slope represents the driving force for the interflow [interflow = base flow; *ibid*: 301] and therefore if this diminishes, then the interflow must also decrease.”

Für die höheren Spitzenabflüsse bei gröberen Auflösungen ist im Grunde derselbe Mechanismus verantwortlich. “Larger grid sizes bias TOPMODEL towards the prediction of higher con-

tributions of surface runoff, which exaggerates the flood peaks [...]” (Brasington und Richards 1998: 308). Zusätzlich beschleunigt der höhere Anteil an Oberflächenabfluss die Rezession des Abflusses, so dass der aufgezeigte Effekt tieferer Rezessionsabflüsse bei gröberen Auflösungen eintritt.

Die Simulation grösserer gesättigter Flächen resultiert aus (7.4, S. 75), hier noch einmal angeschrieben:

$$D_{x,y} = \bar{D} + m \left[ \lambda - \ln \frac{a}{\tan \beta} \right] \quad (7.4)$$

$D_{x,y}$  bezeichnet die Tiefe zum Grundwasserspiegel. Bei positiven Werten für  $D_{x,y}$  ist der Punkt  $(x,y)$  ungesättigt. Nimmt  $D_{x,y}$  den Wert von 0 oder einen negativen Wert an, gilt  $(x,y)$  als gesättigt und ist Teil der Variablen Beitragenden Fläche. Die Auflösungsabhängigkeit der Modellierung des Basisabflusses wurde oben schon erläutert. Über Veränderungen des Basisabflusses wirkt der Mittelwert des Topographischen Index auf die Wasserbilanz des Einzugsgebiets. Diese wiederum bestimmt direkt die mittlere Tiefe zum Grundwasserspiegel,  $\bar{D}$ . Für gröbere Auflösungen fällt der Basisabfluss wie oben gesehen kleiner aus als für feine Auflösungen. Damit einher geht (relativ zu Modellierungen mit feinerer Auflösung) ein Feuchterwerden des Einzugsgebiets, nachvollziehbar anhand der Kontinuitätsgleichung (7.6, S. 76), hier noch einmal angeschrieben:

$$\bar{D}(t+1) = \bar{D}(t) + \frac{Q_b(t) - Q_v(t)}{A} \cdot \Delta t \quad (7.6)$$

Wenn  $Q_{b,1} < Q_{b,2}$ , wird  $\bar{D}_1(t+1) < \bar{D}_2(t+1)$  (1: gröbere Auflösung; 2: feinere Auflösung). Das heisst, in der Modellierung mit gröberer Auflösung liegt der Grundwasserspiegel im Mittel näher an der Bodenoberfläche als in der Modellierung mit feiner Auflösung. Dies impliziert aber, dass in der gröber aufgelösten Modellierung ein grösseres Gebiet dazu neigt, Teil der Beitragenden Fläche zu werden. Dies ist mathematisch nachvollziehbar anhand der Formel zur Berechnung der lokalen Tiefe zum Grundwasserspiegel (7.4, oben).

## 8.5. Kompensation von Modellierungsunterschieden

In einem zweiten Durchgang von Modellierungen mit TOPMODEL wurde dann die Kompensationsformel, die Franchini et al. (1996) vorgeschlagen haben, angewendet. Sie erlaubt es, die Parameterwerte von TOPMODEL derart anzupassen, dass die in Abschnitt 8.4 geschilderten Effekte unterschiedlich aufgelöster Grundlagedaten vermindert werden. In diesem Abschnitt werden nun diese Methodik und ihre Anwendung auf die vorliegende Untersuchung erläutert. Schliesslich wird anhand desselben zeitlichen Ausschnitts aus dem Spektrum der Ganglinien wie in Abschnitt 8.4 die korrigierte mit der unkorrigierten Modellierungsreihe verglichen.

Franchini et al. (1996: 319) betrachten für die Entwicklung ihres Ansatzes zwei Index-Kurven, wobei die zweite eine Translation der ersten darstellt, dergestalt, dass für die Mittelwerte der beiden Index-Verteilungen,  $\lambda_1$  und  $\lambda_2$ , gilt:  $\lambda_1 < \lambda_2$ . Die beiden Index-Kurven haben also dieselbe Form, ihre Lage ist aber unterschiedlich. Wenn der Modellparameter  $m$  und die Einzugsgebietsfläche konstant gehalten werden, ist es laut Franchini et al. (1996) unter geeigneter Wahl der Werte von  $K_0$  bzw.  $T_0$  ( $T_0 = K_0 \cdot m$ ) möglich, denselben modellierten Abfluss zu erhalten. „Intuitively speaking, this choice must take account of the fact that a basin with a lower gradient will require a higher transmissivity value than is the case for a basin with a steeper slope to generate the same hydrograph“ (Franchini et al. 1996: 319). Unter obigen Bedingungen und unter der Annahme, dass zu allen Zeitpunkten  $\bar{D}_1 = \bar{D}_2$ , gilt:

$$\lambda_1 - \lambda_2 = \ln \frac{T_{0,1}}{T_{0,2}} \quad \text{bzw.} \quad \lambda_1 - \lambda_2 = \ln \frac{K_{0,1}}{K_{0,2}}, \quad \text{nach } T_{0,1} \text{ aufgelöst: } T_{0,1} = T_{0,2} \cdot \exp(\lambda_1 - \lambda_2) \quad (8.3)$$

Unter der Verwendung von  $K_0 = 20 \text{ m h}^{-1}$  für die Auflösung 20 Meter und  $m = 0.032 \text{ m}$  (entspricht  $T_0 = 0.64 \text{ m}^2 \text{ h}^{-1}$ ) resultieren gemäss (8.3) die in Abbildung 60 gezeigten Werte für  $K_0$ .

Franchini et al. (1996) überprüfen die Tauglichkeit der Korrektur über den Wert von  $K_0$  bzw.  $T_0$ , indem sie ein Einzugsgebiet mit Index-Kurven, die von Rastern verschiedener Zellgrössen abgeleitet worden sind, kombiniert mit gemäss der Korrekturformel angepassten Werten für  $K_0$  modellieren. „(...) the runoffs obtained by application of [the equation] for the calculation of  $K_0$  are virtually the same with variations in the grid size (...)“ (Franchini et al. 1996: 321). Kleine Unterschiede, die in der Modellierung auftreten, schreiben Franchini et al. (1996) der Tatsache zu, dass die Index-Kurven von unterschiedlich aufgelösten DTM nur in idealisierter Sichtweise eine reine Translation erfahren. Wie in 7.3.1 besprochen, geht in solch einem Fall mit der Ver-

schiebung üblicherweise auch eine (mehr oder weniger grosse) Deformation der Verteilungsfunktion einher. Diesen Effekt hatten vor ihnen schon Bruneau et al. (1995) beschrieben.

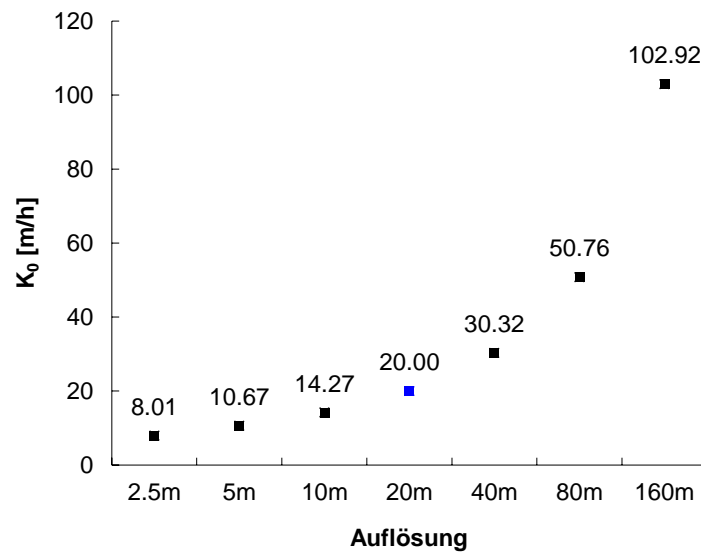


Abb. 60:  $K_0$ -Werte nach der Korrektur gemäss Franchini et al. (1996) ( $K_0 = 20 \text{ m h}^{-1}$  als Ausgangspunkt für die Korrektur)

Die Höhe der  $K_0$ -Werte aller Auflösungen sind aussergewöhnlich (vgl. Abbildung 59). Auch kalibrierte Werte für  $K_0$  liegen um Grössenordnungen zu hoch. Diese hohen Werte scheinen indes nötig zu sein, um TOPMODEL zu skalieren. “ $K_0$  compensates for increases in grid size by modulating the growth of effective contributing area and thus regularizing the model predictions” (Brasington und Richards 1998: 309). Franchini et al. (1996: 334f.) plädieren sogar dafür,  $K_0$  als eine Art künstliche hydraulische Leitfähigkeit zu betrachten, die nicht nur auf der Charakteristik des Bodens basiert, sondern eben auch auf der Rasterzellengrösse des verwendeten DTM.

Abbildung 61 zeigt die resultierenden Abflussganglinien der untersuchten Auflösungen mit der Korrektur nach Franchini et al. (1996) über denselben Ausschnitt wie Abbildung 59. Die vollständigen Ganglinien über sämtliche Iterationen sind wiederum im Anhang (A5) enthalten.

Wie oben geschildert berücksichtigt der verwendete Kompensationsansatz nur die Mittelwerte des Topographischen Index verschiedener Auflösungen und nicht die Form der Verteilungsfunktionen. Besonderes Augenmerk ist also darauf zu legen, was die Formel von Franchini et al. (1996) für die Auflösungen 40, 80 und 160 Meter leistet. Die Verteilungsfunktionen der genannten Auflösungen unterscheiden sich am deutlichsten von denen der feineren Auflösungen.

Allgemein kann festgestellt werden, dass die Abflussganglinien sehr viel kongruenter sind, als in der unkorrigierten Modellierung. Immer noch schwingen die Ganglinien gröberer Auflösungen während der durch Oberflächenabfluss verursachten Spitzen obenaus. In der Rezessionspha-



se liegen sie in der Regel immer noch leicht unter den Ganglinien feinerer Auflösungen. Dies kann als Bestätigung der Aussagen von Brasington und Richards (1998) dienen, wonach der Ansatz von Franchini et al. (1996) für Auflösungen über 100 Meter  $K_0$  etwas unterschätzt.

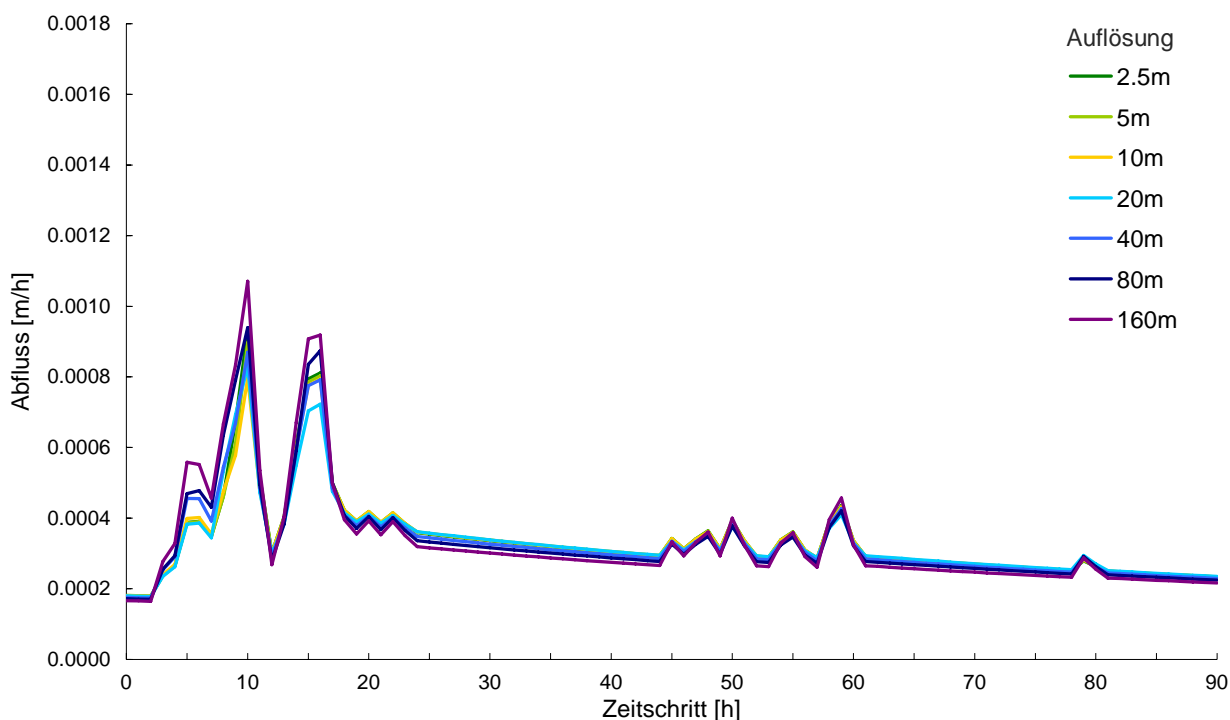


Abb. 61: Abflussganglinien über 90 Stunden, mit Korrektur

Die Abbildungen 62a und b zeigen die jeweilige Nash-Sutcliffe-Efficiency der modellierten Abflussganglinien in bezug auf die Ganglinie der Auflösung 2.5 Meter. Insgesamt liefert der untersuchte Korrekturansatz deutlich kongruentere Resultate als die unkorrigierten Modellierungen. Mit Korrektur liegt sogar die Efficiency der größten untersuchten Auflösung noch über 80%. Ohne Korrektur der  $K_0$ -Werte wird die Efficiency bereits für die Auflösung von 80 Metern negativ und fällt für 160 Meter bis unter -2. Ein deutliches Abfallen in der Übereinstimmung der Modellierung erfolgt bereits zwischen den Auflösungen von 20 und 40 Metern. Wie schon in Abschnitt 8.2 gesehen, unterscheiden sich die Verteilungsfunktionen von 40 Metern Auflösung und darüber deutlich von jenen der feineren Auflösungen. Das steile Abfallen in der Übereinstimmung sowie auch bei den feineren Auflösungen weiterhin bestehende Modellierungsdifferenzen lassen sich einerseits durch die etwas vereinfachenden Annahmen, die dem Ansatz von Franchini et al. (1996) als Basis dienen, und andererseits durch Unterschiede in der Form der Verteilung des Topographischen Index erklären.

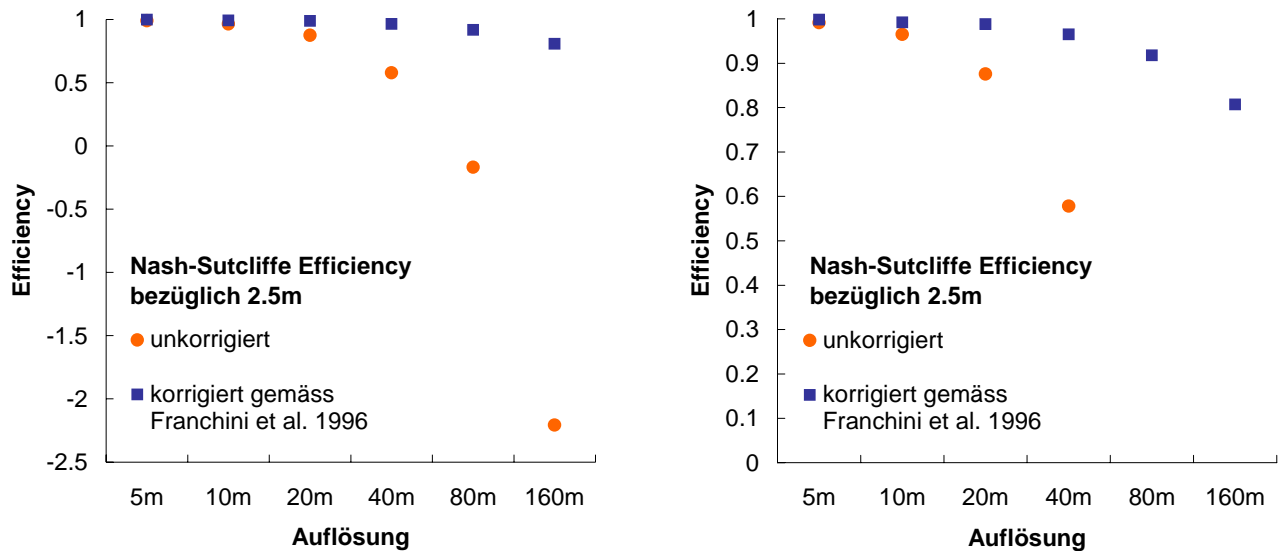


Abb. 62a: Nash-Sutcliffe Efficiency der modellierten Ganglinien

Abb. 62b: wie a, aber unter Ausblendung der negativen Efficiency-Werte

Abbildung 63 ist ein Ausschnitt aus Abbildung 56 in Abschnitt 8.2. Die Verteilung des Topographischen Index wird für gröbere Auflösungen stärker rechtsschief (vgl. Abbildung 56 in 8.2). Die Auflösungen 40, 80 und 160 Meter liegen im Bereich der hohen Index-Werte deutlich über den Verteilungen der feineren Auflösungen und zeigen ausserdem diverse Ausstülpungen der Verteilungsfunktion, die in den anderen Auflösungen fehlen. Diese führen bei der unkorrigierten Modellierung dazu, dass diese Auflösungen deutlich mehr Oberflächenabfluss generieren. Dies kann leicht anhand (7.4, S. 75 bzw. 101), der Formel für die lokale Tiefe zum Grundwasserspiegel, nachvollzogen werden. Für die Ausprägungen des lokalen Grundwasserspiegels ist nicht allein die Lage des mittleren Topographischen Index von Bedeutung, sondern durch die Verwendung der Differenz  $\lambda - \ln(a/\tan \beta)$  die relative Lage des mittleren Index-Werts zu den relevanten – also den hohen – Index-Werten. Diese Lage ist nun bei stärker rechtsschiefen Verteilungen des Index derart verschoben, dass die lokale Tiefe zum Grundwasserspiegel allgemein kleiner wird und mehr Oberflächenabfluss generiert wird.

Neben der schon erläuterten Beeinflussung des Basisabflusses, die auf die Wasserbilanz und damit auf die mittlere Tiefe zum Grundwasserspiegel durchschlägt, ist dies der zweite Effekt, der die Generierung von Oberflächenabfluss in den unterschiedlichen Auflösungen verzerrt. Anhand der zu Beginn dieses Abschnitts gegebenen Erläuterung des Ansatzes von Franchini et al. (1996) ist klar, dass dieser Effekt nicht durch die Anpassung von  $K_0$  abgefangen wird. Diese geschieht ja lediglich mit Bezug auf den Mittelwert des Topographischen Index und nicht auf dessen Verteilung. Es ist primär die Verteilung in den oberen Wertebereichen des Topographischen Index, die dafür sorgt, dass auch die korrigierten Modellierungen nicht vollständig übereinstimmen.

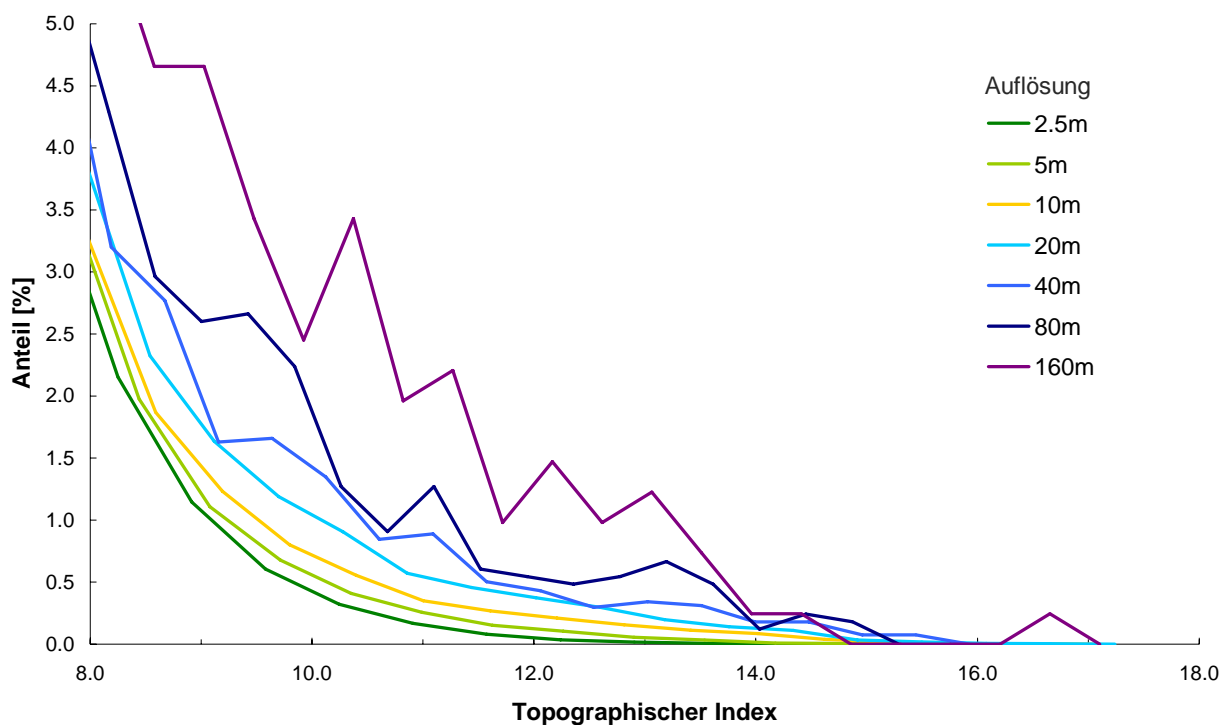


Abb. 63: Verteilung des Topographischen Index im Intervall [8, 18]

## 8.6. Andere Modellgrößen

Die verwendete TOPMODEL-Version erlaubt neben der Ausgaben von Ganglinien auch die Auslesung des Abfluss über die gesamte Modellierungsdauer, der maximal auftretenden Beitragenden Fläche und der Abflusszusammensetzung (Anteil Oberflächen- bzw. Basisabfluss). In der Folge wird kurz auf diese Größen eingegangen und gezeigt, wie die Unterschiede zwischen den einzelnen Auflösungen ohne und mit Korrektur ausfallen.

### 8.6.1. Abflusszusammensetzung

Wie den Abbildungen 64a und b entnommen werden kann, bewirkt die Anpassung der  $K_0$ -Werte das erwartete Angleichen der jeweiligen Abflussanteile. Der Anteil an Oberflächenabfluss ist zwar bei größeren Auflösungen auch in der korrigierten Modellierungsreihe noch deutlich erhöht, insgesamt stimmen die Werte der unterschiedlichen Auflösungen aber sehr viel besser überein als in der Modellierungsreihe ohne angepasstes  $K_0$ . Diese Verbesserung hat wie in Abschnitt 8.5 gesehen direkt zur Folge, dass die Abflussspitzen (verursacht durch den Oberflächenabfluss) in den größeren Auflösungen nicht mehr so stark überbetont sind.

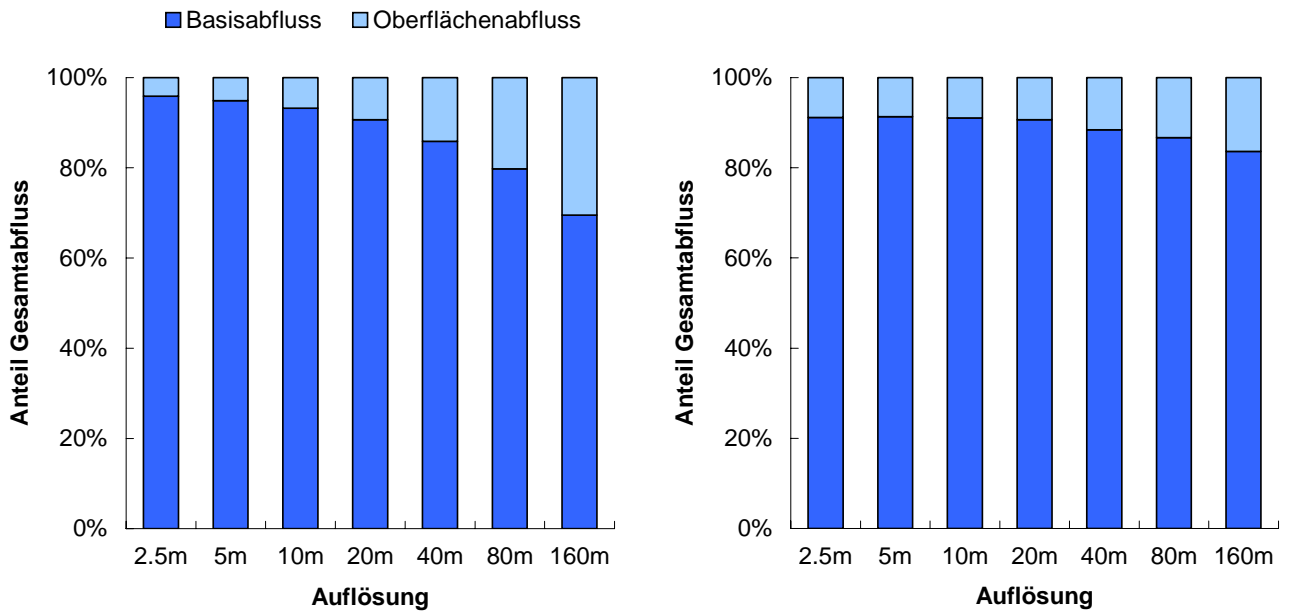


Abb. 64a: Zusammensetzung des modellierten Abflusses

Abb. 64b: wie a, aber mit Korrektur

### 8.6.2. Maximale Beitragende Fläche

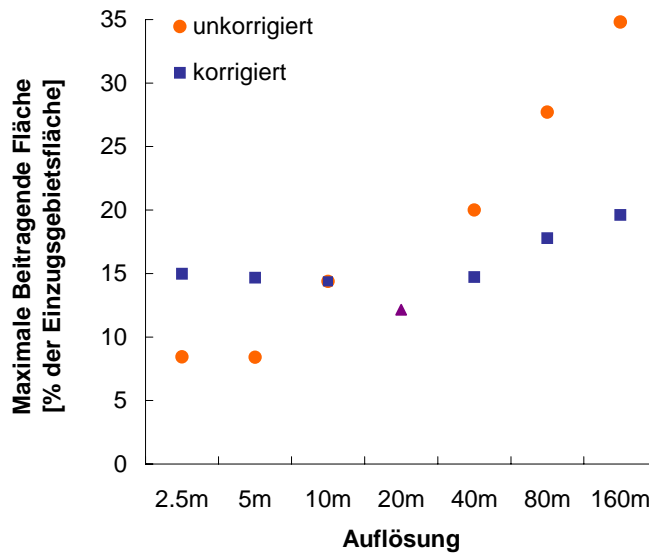


Abb. 65: Maximale Beitragende Fläche

Abbildung 65 zeigt den Anteil der maximalen Beitragenden Fläche am gesamten Einzugsgebiet in den verschiedenen Modellierungen. Insgesamt ergibt sich durch die Anpassung von  $K_0$  ebenfalls eine grössere Kongruenz der Modellierungsergebnisse. Die maximale Beitragende Fläche ist in der Auflösung von 10 Metern im unkorrigierten und im korrigierten Modelldurchlauf iden-

tisch. Diese Übereinstimmung ist aber zufällig entstanden. In den unkorrigierten Modellierungen steigt die maximale Beitragende Fläche für gröber aufgelöste DTM steil an. Dieser Umstand führt zu den überhöhten Anteilen an Oberflächenabfluss in eben diesen Modellierungen (vgl. Abschnitt 8.6.1).

## 9. Zusammenfassung TOPMODEL

- Für die Untersuchung anhand von TOPMODEL wurden sieben DTM mit Auflösungen von 2.5, 5, 10, 20, 40, 80 und 160 Metern erstellt. Aufgrund dieser DTM wurde dann die topographische Eingangsgrösse in TOPMODEL, der Topographische Index, berechnet.
- In einer ersten Serie von Modellierungen wurde mit aus der Literatur entnommenen Modellparametern gearbeitet und die resultierenden Modellierungsunterschiede analysiert. In einem zweiten Schritt wurde dann die Kompensation von Modellierungsunterschieden gemäss der Methode von Franchini et al. (1996) auf die Untersuchung angewendet, um zu überprüfen, inwieweit die Resultate verbessert (in diesem Falle untereinander kongruenter) werden.

Gibt es abhängig von der Auflösung der verwendeten Eingangs-Höhendaten Unterschiede in den Resultaten eines global aggregierenden Modells wie TOPMODEL?

Wie lassen sich die Unterschiede charakterisieren?

- In den modellierten Abflussganglinien sowie in allen zusätzlich untersuchten Grössen wie Anteil Basisabfluss, Anteil Oberflächenabfluss und maximale Beitragende Fläche wurden Unterschiede in den einzelnen Modellierungen verschiedener Auflösungen gefunden.
- Mit gröber werdender Auflösung akzentuieren sich die modellierten Abflussspitzen deutlich. Die höheren Spitzenabflüsse werden dadurch kompensiert, dass die Rezession der Ganglinien in diesen Auflösungen schneller verläuft.
- Die Abflusszusammensetzung variiert ebenfalls mit der verwendeten DTM-Auflösung. Bei feineren Auflösungen ist der Anteil an Oberflächenabfluss deutlich geringer als bei gröber aufgelösten Daten. Dies hängt direkt mit den unterschiedlich gross modellierten Beitragenden Flächen zusammen.

Lassen sich die räumlichen Gebiete, die besonders stark zu den Unterschieden im Resultat beitragen, charakterisieren?

- Als wesentlichster Faktor ist eine Verflachung der Hangneigungen im Einzugsgebiet für gröbere Auflösungen festzustellen. Steile Gebiete, die in gröberen Auflösungen nicht mehr repräsentierbar sind, werden daher als Hauptgrund für nachfolgende Modellierungsunterschiede angesehen.
- Die mit gröberer Auflösung zusehends verflachte Topographie verursacht eine Verschiebung des mittleren Topographischen Index hin zu höheren Werten in eben diesen Auflösungen.

- Auch das räumliche Muster des Topographischen Index ändert sich für unterschiedliche Auflösungen. In den feinsten Auflösungen ist das Muster des Index noch sehr dendritisch und auch kleinste Fliessgerinne können relativ hohe Index-Werte erhalten. In den gröberen Auflösungen erhalten nur noch die grössten Haupttäler hohe Index-Werte und können Teil der Beitragenden Fläche werden.

Welche möglichen Ursachen für Modellierungsunterschiede können ausgemacht werden?

- Unterschiedliche Repräsentationen des Geländes führen sowohl zu einer Translation als auch zu einer Verformung der Verteilungsfunktion des Topographischen Index.
- Diese Veränderungen führen zu geringeren Basisabflüssen und somit zu geringeren Sättigungsdefiziten in gröber aufgelösten Modellierungen. Das Einzugsgebiet tendiert dadurch dazu, früher grössere Beitragende Flächen und damit erhöhten Oberflächenabfluss zu entwickeln.
- Als untergeordneter Faktor für Unterschiede in der Verteilung des Topographischen Index bzw. in der Modellierung ist die Granularität der Untersuchung zu nennen. Sie beeinflusst direkt die minimale entwässernde Fläche einer Rasterzelle.

Die Modellierungen, die mit einem fixen Parameterset durchgeführt worden waren, wurden auch mit Modellierungen verglichen, für die der Korrekturansatz gemäss Franchini et al. (1996) getestet worden war.

- Aus der Korrektur resultierten insgesamt deutlich kongruentere Resultate in den verschiedenen Auflösungen.
- In der Gesamtschau fallen nur die Auflösungen von 80 und 160 Metern relativ deutlich ab.
- Die Methode von Franchini et al. (1996) kann – beurteilt aufgrund der Abflussganglinien, der Abflusszusammensetzung sowie der maximalen Beitragenden Fläche – mit den verwendeten Datenquellen und Auflösungen auflösungsinduzierte Unterschiede in der Verteilung des Topographischen Index teilweise ausmerzen und die Modellierungsergebnisse homogenisieren.

## 10. Fazit

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, die Sensitivität von zwei ausgesuchten Prozessmodellen in bezug auf verschiedene Auflösungen von Höhendaten zu untersuchen. Es wurden diverse Unterschiede in den verschiedenen aufgelösten Modellierungen beider Prozessmodelle aufgezeigt und analysiert. Die Analysen erfolgten sowohl anhand der statistischen Auswertung von Modellgrößen als auch anhand der Betrachtung von Modelleingangsgrößen und/oder -resultaten mit räumlicher Ausprägung. Die räumlichen Betrachtungen erfolgten oft anhand von dreidimensionalen Darstellungen. Diese Darstellungsform erleichtert das Verbinden von Modellierungsergebnissen mit den zugrundeliegenden Geländeformen. Für beide untersuchten Modelle wurden Quellen für Modellierungsunterschiede ausgemacht und erläutert. Auch Gebiete, die stark zu den Differenzen in den Resultaten beitrugen, wurden charakterisiert. Für das zweite Prozessmodell, TOPMODEL, wurde versuchsweise ein der Literatur entnommener Korrekturansatz angewendet.

Das Fazit der vorliegenden Arbeit ist in drei Teile untergliedert. Im ersten Abschnitt wird summarisch aufgelistet, was im Rahmen dieser Arbeit umgesetzt und erreicht worden ist. Im zweiten Abschnitt werden Erkenntnisse geschildert, die aus diesen Arbeitsschritten gewonnen worden sind. Im letzten Abschnitt werden, ausgehend vom Erreichten, mögliche zukünftige Forschungsfelder aufgezeigt.

### 10.1. Erreichtes

- Die beiden verwendeten Prozessmodelle, Daisyworld und TOPMODEL, wurden in einer Tiefe geschildert, die die anschließende Analyse von Modellierungsunterschieden erlaubte. Zu TOPMODEL wurde der aktuelle Forschungsstand in bezug auf die Auflösungssensitivität aufgezeigt.
- Für beide Prozessmodelle wurden Modellläufe mit fünf bzw. sieben unterschiedlich aufgelösten Eingangsdaten durchgeführt und dabei diverse Ausgangsdaten generiert. Bei TOPMODEL handelt es sich um eine der ersten Untersuchungen mit fein aufgelösten, LIDAR-basierten Höhendaten. Daisyworld wurde erstmals von Purves (2003) verwendet, um Gelände-repräsentationen zu untersuchen.
- Die Modellierungsergebnisse und andere Ausgangsdaten wurden mittels statistischer und räumlicher Betrachtungen auf Unterschiede zwischen den verschiedenen Auflösungen untersucht. Wo sinnvoll, wurden ergänzend auch Unterschiede in gewissen Eingangsdaten analysiert.



- Für beide Prozessmodelle wurden dann mögliche Quellen für Modellierungsunterschiede eruiert und erläutert. Gebiete, in denen die Modellierungsunterschiede im fokalen Modell besonders gross waren bzw. die besonders stark zu den Modellierungsunterschieden im globalen Modell beitrugen, wurden charakterisiert.
- Schliesslich wurde für TOPMODEL zusätzlich ein der Literatur entnommener Korrekturan-satz angewendet und dessen Performanz für die verschiedenen Auflösungen geprüft.

Auf der technologischen Seite wurden diverse Programme implementiert:

- Die Interpolation von den LIDAR-Daten wurde in MathWorks' Matlab implementiert. Beim Interpolator handelt es sich um einen IDW-Algorithmus mit Exponent 2.
- Die Datenprozessierung für TOPMODEL umfasste die Berechnung des Topographischen Index mittels des *Multiple Flow Direction*-Algorithmus gemäss Quinn et al. (1995) und die Ausgabe einer Rasterrepräsentation und einer TOPMODEL-kompatiblen Statistikdatei. Für diese Aufgaben wurde eine Implementation in Java unter Eclipse geschrieben.
- Für die Modellierung von Daisyworld wurden existierende Klassen von Purves (2003) übernommen. Diese wurden in manchen Teilen angepasst und um eine eigene Steuerungsklasse ergänzt.
- Zur rationalen Verarbeitung der Daisyworld-Resultatraster wurden geeignete Algorithmen in VBA für ArcObjects programmiert. Diese umfassten die Batch-Konversion und -Visualisierung der Zählraster, sowie die automatische Generierung von Dominanz- und Querschnittstern.
- Für das Auslesen von Kenngrössen zur Erstellung bestimmter Grafiken (Box-Whisker-Plots, Verteilungen und kumulative Verteilungen von topographischen Grössen) wurde eine Implementation in Java unter Eclipse geschrieben.

## 10.2. Erkenntnisse

### **Unterschiede in den Eingangsdaten**

In den Eingangsdaten der beiden Prozessmodelle konnten in verschiedenen Auflösungen Unterschiede in der Verteilung festgestellt werden.

Die Hangneigung wurde (für Daisyworld und TOPMODEL) in verschiedenen Auflösungen untersucht. Für gröbere Auflösungen wurden geringere maximale Hangneigungswerte und eine geringere durchschnittliche Hangneigung festgestellt.

Im für TOPMODEL verwendeten Einzugsgebiet treten zusätzlich Veränderungen in der Form der Verteilungsfunktionen der Hangneigung für die Auflösungen von über 40 Metern ein. Dies schlägt sich auch in der Verteilung der eigentlichen Eingangsgrösse für TOPMODEL, des Topographischen Index, nieder. Für gröbere Auflösungen ist der Index-Mittelwert zu höheren Werten hin verschoben. Die Verteilung wird derweil stärker rechtsschief. Bei den hohen Index-Werten liegen die Verteilungen der drei grössten Auflösungen deutlich über allen anderen.

### **Modellierungsunterschiede**

Beide untersuchten Prozessmodelle, Daisyworld und TOPMODEL, zeigen in verschiedenen Auflösungen Differenzen in den Modellierungsergebnissen.

Die Daisyworld-Modellierungen verschiedener Auflösungen unterscheiden sich in den Verläufen der relativen Landnutzungsanteile, der durchschnittlichen Hangneigung, potentiellen kurzwelligen Einstrahlung und Temperatur sowie in der räumlichen Verteilung der Daisy-Arten und der unbewachsenen Zellen. Für viele Modellgrössen verhält sich die Auflösung von 20 Metern atypisch. In der räumlichen Betrachtung der Modellierungsergebnisse konnte eine Tendenz zur Entmischung und der ökologischen Spezialisierung der Daisies für eine gröber werdende Auflösung ausgemacht werden.

Die TOPMODEL-Modellierungen verschiedener Auflösungen unterscheiden sich in den resultierenden Abflussganglinien. Für gröbere Auflösungen werden die Abflussspitzen überbetont. In der Rezessionsphase liegen die Ganglinien dann tiefer als jene der feineren Auflösungen. Die Betonung der Abflussspitzen bei groben Auflösungen erfolgt aufgrund massiv grösserer Beitragender Flächen und den dadurch erhöhten Mengen von Oberflächenabfluss.

### **Quellen für Modellierungsunterschiede**

Für Daisyworld wurden vier mögliche Quellen von Modellierungsunterschieden eruiert: Einflüsse der veränderten Repräsentation der Topographie, die Granularität der Modellierung und damit zusammenhängend der Anteil Rand am Untersuchungsgebiet sowie die Definitionen des Zells-

lärautomaten und der Wärmediffusion, die über die Nachbarschaft erfolgten. Einflüsse der veränderten Topographie konnten nicht einfach allgemein mit Differenzen in den Modellresultaten verknüpft werden, aber einzelne spezifische Unterschiede in den räumlichen Mustern von Daisyworld deuten doch auf die Existenz solcher Einflüsse hin. Vor allem zwei Typen von Gebieten verursachten geländebezogene Modellierungsunterschiede. Einerseits entzog das mit gröberer Auflösung zunehmende Verschwinden kleiner Kuppen im Südhang den weissen Daisies die Lebensgrundlage in diesem Gebiet. Andererseits wurden ein relativ horizontales, aber doch etwas reliefiertes Gebiet am Hangfuss mit gröberer Auflösung vollständig eingeebnet und dadurch die Temperaturen lebensunfreundlich.

Allgemein verunmöglichte die Existenz von vorher wenig bedachten Quellen für Modellierungsdifferenzen eine weitergehende Isolation der einzelnen Einflüsse auf die Daisyworld-Modellierung. Die Resultate der Auflösung von 20 Metern legen (zumindest für diese Auflösung) nahe, dass Einflüsse der Topographie nicht die Hauptursache für Modellierungsdifferenzen darstellen.

Für TOPMODEL konnte der Einfluss von Veränderungen in der Repräsentation der Topographie isolierter beobachtet werden. Bei der Berechnung des Topographischen Index war mittelbar über die entwässernde Fläche lediglich noch die (auch bei Daisyworld bedeutsame) Granularität als Einflussfaktor für Modellierungsunterschiede von Bedeutung. Ansonsten rührten Differenzen in verschieden aufgelösten Modellierungen allein von der veränderten Verteilung der Hangneigung bzw. des Topographischen Index. Wie diese auflösungsinduzierten Veränderungen im Modellgefüge wirkten, konnte detailliert analysiert und beschrieben werden.

Für TOPMODEL wurde ein der Literatur entnommener Korrekturansatz angewendet. Dieser erlaubt es, Modellierungsdifferenzen, die durch unterschiedlich aufgelöste Höhendaten entstehen, mittels der Anpassung eines hydrologischen Parameters zu vermindern. Die Qualität der erreichten Korrektur wurde anhand der Form der Abflussganglinien, der Abflusszusammensetzung und der maximalen Beitragenden Fläche überprüft und über weite Bereiche für gut befunden.

### **Übertragbarkeit**

Die vorliegende Arbeit untersuchte zwei exemplarisch ausgewählte Prozessmodelle auf ihre Sensitivität in bezug auf die Auflösung von neuartigen Höhendaten. Daisyworld ist ein Zellulärautomat mit teilweise stochastischen Elementen. Als topographische Eingangsgrößen werden die Hangneigung und die Exposition verwendet. Die Modellierung verläuft dann fokal aggregierend. TOPMODEL ist demgegenüber ein streng deterministisches Niederschlagsabfluss-Modell. Der Topographische Index ist die einzige Eingangsgröße. Die Modellierung ist global aggregierend.

Alle untersuchten Eingangsgrößen (Derivat 1. Ordnung und ein zusammengesetztes Derivat) zeigten Sensitivität in bezug auf die Auflösung. Beide Modelle, die auf diesen auflösungssensitiven Eingangsdaten basierten, zeigten Unterschiede in den Resultaten. Vielleicht wider Erwarten pflanzten sich auflösungsbedingte Unterschiede in den Daten auch in der globalen Modellierung bis ins Resultat fort. Die Modellierung führte nicht zu einer Milderung oder zu einem „Verwischen“ der Unterschiede in den Eingangsdaten.

Als mögliche Quellen für diese Differenzen wurden Veränderungen in der repräsentierten Topographie, die Granularität, sowie für Daisyworld zusätzlich Randeffekte und die Definition des Zellulärautomaten und der Diffusion eruiert.

Die vier Einflussfaktoren für Daisyworld sind auf andere topographiebasierte Zellulärautomaten übertragbar. Ihnen muss bei einer Modellierung mit Zellulärautomaten also spezielle Beachtung geschenkt werden. Es ist zwar denkbar, dass in anderen Modellierungen gewissen Faktoren (wie zum Beispiel den Randeffekten) aufgrund einer anderen Modellstruktur oder aufgrund der schieren Größe des Untersuchungsgebiets weniger Gewicht zukommt als bei der hier vorliegenden Untersuchung. Andere Einflussfaktoren aber (wie zum Beispiel die Veränderungen in der Topographie) können beispielsweise in einem streng deterministischen Modell wichtiger sein, als in der Daisyworld-Modellierung. Die Untersuchung anhand von TOPMODEL zeigte, dass Modelle, die auf der Verteilungsfunktion eines topographischen Merkmals funktionieren, sehr anfällig sind für Änderungen an der Auflösung der verwendeten Höhendaten. Gleichzeitig konnte mit TOPMODEL für ein global aggregierendes, halb-verteilt hydrologisches Modell gezeigt werden, dass sich die auflösungsbedingten Modellierungsunterschiede weitgehend kompensieren lassen.

### 10.3. Ausblick

#### **Daisyworld**

Spezifisch für Daisyworld kann versucht werden, die Faktoren, die zu Modellierungsunterschieden führten, weiter zu isolieren. Das Gewicht der Randeffekte könnte zum Beispiel verringert werden, indem das Untersuchungsgebiet vergrößert würde. Die Definition des Zellulärautomaten und der Wärmediffusion könnte mit einer metrischen Ausdehnung versehen werden, so dass diese beiden Modellbestandteile für alle untersuchten Auflösungen identisch sind. Auf diese Weise könnten zwei der vier genannten Einflussfaktoren auf die Modellierung zwischen den verschiedenen Auflösungen einander angenähert bzw. konstant gehalten werden. Dies würde erlau-

ben, den topographischen Einfluss zusammen mit der Granularität in Daisyworld vertieft zu untersuchen.

### **TOPMODEL**

Wie in der Einführung zum Modell erläutert, handelt es sich bei TOPMODEL um ein halb-verteiltes Modell. Das Modell erlaubt also das Rücküberführen eines durchschnittlichen Sättigungsdefizits auf Einzugsgebietsebene in eine räumliche Repräsentation gesättigter und ungesättigter Flächen. In diesem Sinn liefert das global aggregierende Modell TOPMODEL nicht nur eine Abflussganglinie für das Einzugsgebiet sondern eben auch lokale Prognosen über die Grundwassertiefe. Verschiedene Autorinnen und Autoren untersuchen die Qualität dieser räumlichen Prognosen von TOPMODEL oder von Prognosen anhand des Topographischen Index im Hinblick auf die Abschätzung der Bodenfeuchteverteilung oder der Verteilung gesättigter Flächen (vgl. Blyth et al. 2004, Guntner et al. 2004, Blazkova et al. 2002). Diese räumlichen Aussagen werden verwendet, um zum Beispiel eine räumlich verteilte Evapotranspiration, Erosionsanfälligkeit oder Prozesse um den Nährstofftransport zu modellieren (vgl. Xu und Li 2003, Stieglitz et al. 2003). Die Abhängigkeit solcher räumlicher Aussagen TOPMODELS oder des Topographischen Index von der Auflösung der verwendeten Höhendaten sollten Gegenstand zukünftiger Untersuchungen sein.

### **Allgemein**

Die Geographische Informationswissenschaft muss für die in der Einleitung dieser Arbeit skizzierten Probleme, die neuartige Daten verursachen können, Antworten finden. Dazu gehört das Ausdehnen der hier gewonnen Erkenntnisse auf andere Anwendungen von digitalen Höhendaten. Aber nicht nur verschiedene Auflösungen von Höhendaten sollten im Zentrum des Interesses stehen. Auch Datenformate und Interpolationsmethoden, Algorithmen zur Generierung von Derivaten sowie Methoden der Manipulation und Visualisierung als Hilfsmittel bei der Anwendung von Höhendaten müssen weiter untersucht werden. Nach wie vor sind also alle fünf Kategorien der Geländemodellierung nach Weibel und Heller (1991) gültig und die Erkenntnisse der einzelnen Bereiche müssen ausgebaut werden, um mit der technologischen Innovation sowohl auf der Seite der Datenproduktion wie auf jener der Anwendungen Schritt halten zu können. Ziel ist eine möglichst umfassende Sicht auf das Feld der digitalen Geländemodellierung, die es erlaubt, für jede Anwendung von Höhendaten die geeignete Methodik in den fünf Feldern zu benennen.





# Literatur

- Barry R. G. (1992): *Mountain Weather and Climate*. Routledge, London.
- Betson R. P. (1964): What is watershed runoff. In: *Journal of Geophysical Research*, 69(8), 1541ff.
- Beven K. J. (2001a): *Rainfall-Runoff Modelling. The Primer*. John Wiley & Sons Ltd., Chichester.
- Beven K. J. (2001b): TOPMODEL Website. <http://www.es.lancs.ac.uk/hfdg/topmodel.html>. Zugriff: 13.04.2005.
- Beven K. J. (2003): *Rainfall-Runoff Modelling Website*. <http://www.es.lancs.ac.uk/hfdg/beven2000/Beven2000.html>. Zugriff: 13.04.2005.
- Beven K. J., Kirkby M. J. (1979): A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. In: *Hydrological Sciences Bulletin*, 24(1), 43-69.
- Blazkova S., Beven K., Tacheci P., Kulasova A. (2002): Testing the distributed water table predictions of TOPMODEL (allowing for uncertainty in model calibration). The death of TOPMODEL? In: *Water Resources Research*, 38(11), Artikel 1257.
- Blyth E. M., Finch J., Robinson M., Rosier P. (2004): Can soil moisture be mapped onto the terrain? In: *Hydrology and Earth System Sciences*, 8(5), 923-930.
- Brasington J., Richards K. (1998): Interactions between model predictions, parameters and DTM scales for TOPMODEL. In: *Computers & Geosciences*, 24(4), 299-314.
- Bruneau P., Gascuel-Oudoux C., Robin P., Merot Ph., Beven K. J. (1995): Sensitivity to space and time resolution of a hydrological model using digital elevation data. In: *Hydrological Processes*, 9, 69-81.
- Dingman S. L. (2002): *Physical Hydrology*. Second Edition. Prentice-Hall, New Jersey.
- Dyck S., Peschke G. (1983): *Grundlagen der Hydrologie*. Verlag für Bauwesen, Berlin.
- ESRI (2004): *ArcInfo Workstation Help*. Environmental Systems Research Institute, Redlands.
- Fowler R. (2001): Topographic LIDAR. In: Maune D. F. (Hrsg.): *Digital elevation model technologies and applications. The DEM users manual*. ASPRS, Bethesda, Maryland.
- Fowler R. (2005): Adoption of Lidar technology. E-Mail vom 13.04.2005. [bobf@lasermap.com](mailto:bobf@lasermap.com).
- Franchini M., Wendling J., Obled C., Todini E. (1996): Physical interpretation and sensitivity analysis of the TOPMODEL. In: *Journal of Hydrology*, 175, 293-338.
- Freeze R. A. (1972): Role of subsurface flow in generating surface runoff. Part 2, Upstream source areas. In: *Water Resources Research*, 8(5), 1272-1283.
- Guntner A., Seibert J., Uhlenbrook S. (2004): Modeling spatial patterns of saturated areas: An evaluation of different terrain indices. In: *Water Resources Research*, 40(5), Artikel W05114.



- Higy C., Musy A. (2000): Digital terrain analysis of the Haute-Mentue catchment and scale effect for hydrological modelling with TOPMODEL. In: *Hydrology and Earth System Sciences*, 4(2), 225-237.
- Holko L., Lepistö A. (1997): Modelling the hydrological behaviour of a mountain catchment using TOPMODEL. In: *Journal of Hydrology*, 196, 361-377.
- Hugentobler M., Purves R. S., Schneider B. (2005): Evaluating methods for interpolating continuous surfaces from irregular data. A case study. In: Fisher P. F. (Hrsg.): *Developments in spatial data handling*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- Jones K. H. (1998): A comparison of algorithms used to compute hill slope as a property of the DEM. In: *Computers & Geosciences*, 24(4), 315-323.
- Kienzle S. (2004): The Effect of DEM raster resolution on first order, second order and compound terrain derivatives. In: *Transactions in GIS*, 8 (1), 83-111.
- Kirkby M. J. (1969): Erosion by water on hillslopes. In: Chorley R. J. (Hrsg.): *Water, Earth and Man*. Methuen, London.
- Lane S. N., Brookes C. J., Kirkby M. J., Holden J. (2004): A network-index-based version of TOPMODEL for use with high-resolution digital topographic data. In: *Hydrological Processes*, 18, 191-201.
- López C. (2000): Improving the elevation accuracy of digital elevation models. A comparison of some error detection procedures. In: *Transactions in GIS*, 4(1), 43-64.
- McGuffie K., Henderson-Sellers A. (1997): *A climate modeling primer*. Second Edition. John Wiley & Sons, Chichester.
- Moore E. F. (1962): Machine models of self-reproduction. In: Burks A. W. (Hrsg, 1970): *Essays on cellular automata*. University of Illinois Press.
- O'Sullivan D., Unwin D. J. (2003): *Geographic Information Analysis*. John Wiley & Sons, Hoboken.
- Purves R. S. (2003): Daisies and topography – investigating representation of topography in environmental modeling. In: *Proceedings of the GIS Research UK 11<sup>th</sup> Annual Conference GISRUUK 2003*, 48-52.
- Quinn P. F., Beven K. J., Chevallier P., Planchon O. (1991): The prediction of hillslope flow-paths for distributed modelling using digital terrain models. In: *Hydrological Processes*, 5, 59-80.
- Quinn P. F., Beven K. J., Lamb R. (1995): The  $\ln(A/\tan \beta)$  index – How to calculate it and how to use it within the TOPMODEL framework. In: *Hydrological Processes*, 9(2), 161-182.
- Quinn P. F., Beven K. J., Lamb R. (1997): The  $\ln(A/\tan \beta)$  index – How to calculate it and how to use it within the TOPMODEL framework. In: Beven K. J. (Hrsg.): *Distributed Hydrological Modelling. Applications of the TOPMODEL concept*. Wiley, Chichester.

- Saulnier G.-M., Obled C., Beven K. (1997): Analytical compensation between DTM grid resolution and effective values of saturated hydraulic conductivity within the TOPMODEL framework. In: *Hydrological Processes*, 11, 1331-1346.
- Swisstopo (2004): Swisstopo - Amtliche Vermessung. LWN. Einführung. <http://www.swisstopo.ch/de/vd/lwn.htm>. Zugriff: 17.04.2005.
- Swisstopo (2005a): Produktionsstand des DTM-AV. [http://www.swisstopo.ch/pub/down/products/digital/height/state\\_dtm.pdf](http://www.swisstopo.ch/pub/down/products/digital/height/state_dtm.pdf). Zugriff: 15.08.2005.
- Swisstopo (2005b): Metadaten. E-Mail vom 08.04.2005. [roberto.artuso@swisstopo.ch](mailto:roberto.artuso@swisstopo.ch).
- Swisstopo (2005c): Übersichtskarten. <http://www.swisstopo.ch/de/download/freedata/overview>. Zugriff: 15.01.2005.
- Stieglitz M., Shaman J., McNamara J., Engel V., Shanley J., Kling G. W. (2003): An approach to understanding hydrologic connectivity on the hillslope and the implications for nutrient transport. In: *Global Biogeochemical Cycles*, 17(4), Artikel 1105.
- Tarboton D. G. (1997): A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. In: *Water Resources Research*, 33(2), 309-319.
- Von Bloh W, Block A., Schellnhuber H. J. (1997): Self-stabilization of the biosphere under global change. A tutorial geophysical approach. In: *Tellus Series B, Chemical and physical meteorology*, 49(3), 249-262.
- Watson A. J., Lovelock J. E. (1983): Biological homeostasis of the global environment – The parable of Daisyworld. In: *Tellus Series B, Chemical and physical meteorology*, 35(4), 284-289.
- Weibel R., Heller M. (1991): Digital Terrain Modelling. In: Maguire D. J., Goodchild M. F., Rhind D. W. (Hrsg.): *Geographical Information Systems. Principles and Applications*. Longman Scientific & Technical, Essex..
- Wolfram S. (1986): *Advanced series on complex Systems – volume 1. Theory and applications of cellular automata*. World Scientific, Singapore.
- Wolock D. M., Price C. V. (1994): Effects of digital elevation model map scale and data resolution on a topography-based watershed model. In: *Water Resources Research*, 30(11), 3041-3052.
- Xu Z. X., Li J. Y. (2003): Estimating basin evapotranspiration using distributed hydrologic model. In: *Journal of Hydrologic Engineering*, 8(2), 74-80.
- Zhang W., Montgomery D. R. (1994): Digital elevation model grid size, landscape representation, and hydrologic simulations. In: *Water Resources Research*, 30(4), 1019-1028.



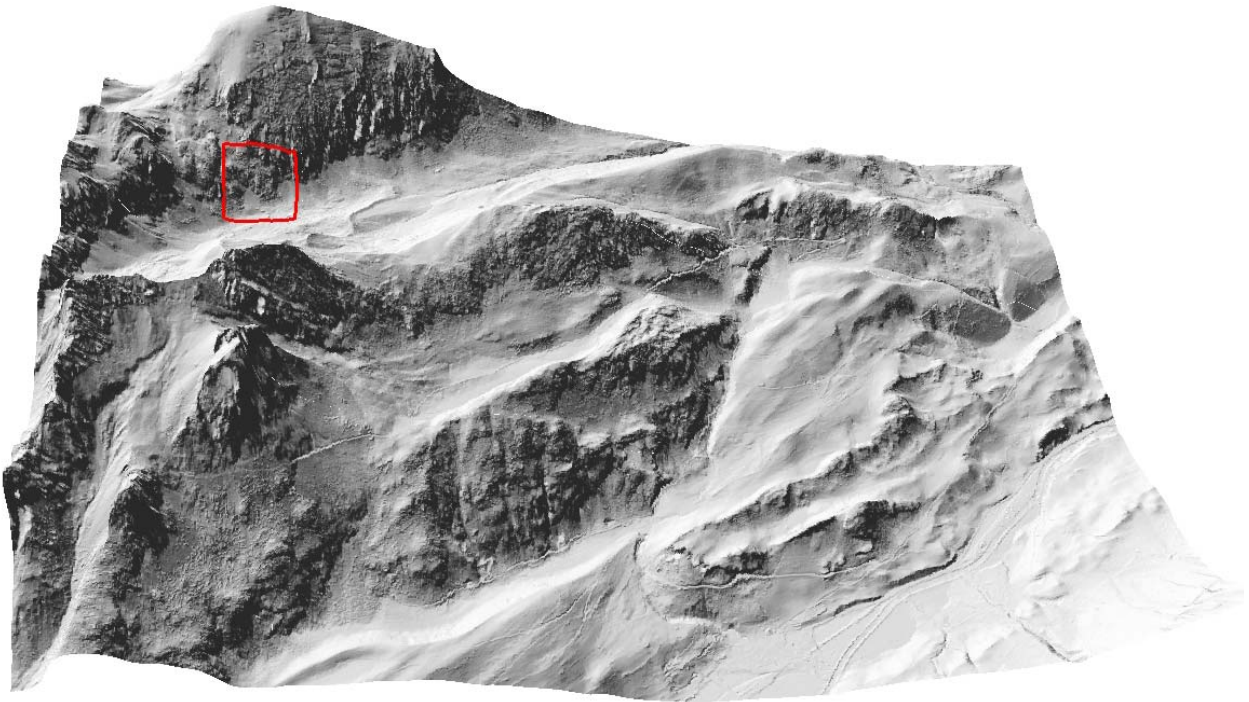
# Anhang

## A1: Metadaten zur LIDAR-Apparatur und -methodik für DTM-AV und DOM-AV

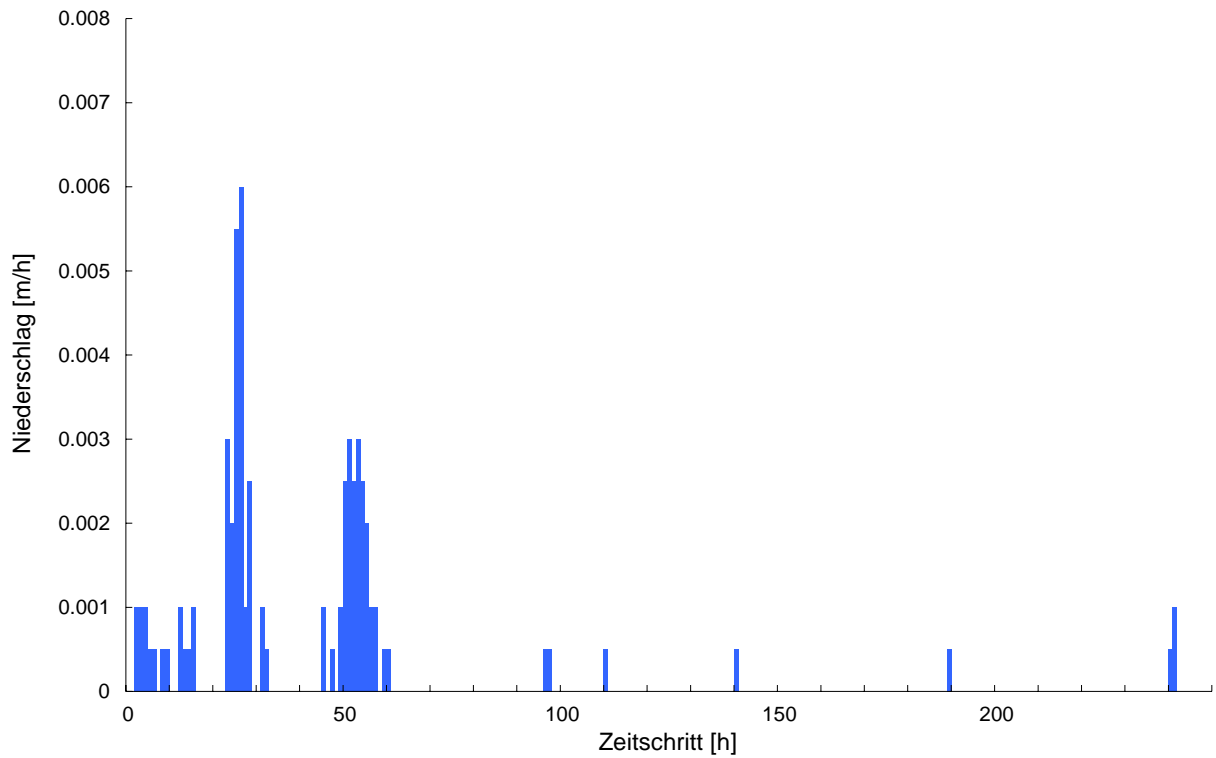
Lidar-Einheit	TerraPoint ALTMS 2536 (Airborne Laser Terrain Mapper System von Optech)
Plattform:	Pilatus Porter
Wellenlänge	1064 nm
Pulsenergie	> 0.15 mJ bei 20 kHz
Pulsdauer	10 ns
Strahlableitung	< 4.5 mrad
Aufzeichnungswinkel	36°
Pulsrate	20 kHz
Scan-Rate	43 Hz
Maximale Anzahl aufgezeichneter Returns	4
Scanmuster	Parallele Linien
Flughöhe über Grund	3000 Fuss bzw. 915 Meter
Breite des Aufzeichnungstreifens	600 Meter bei 915 Meter Flughöhe
Querüberdeckung	50%
Fluggeschwindigkeit	110 Knoten bzw. 204 km/h
Flugrichtung	Je nach Topographie

Quelle: Swisstopo, 2005b

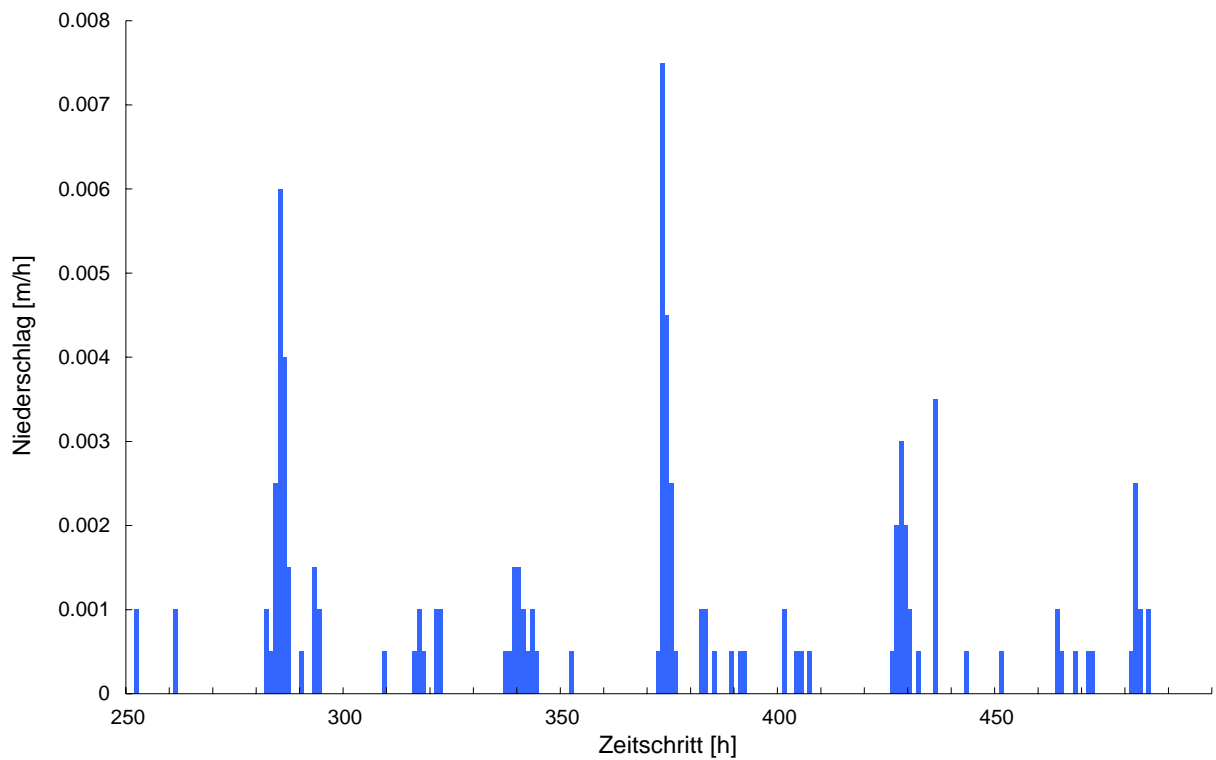
**A2: Lage des Daisyworld-Untersuchungsgebiets bei Boltigen innerhalb DTM-AV 1226-23**



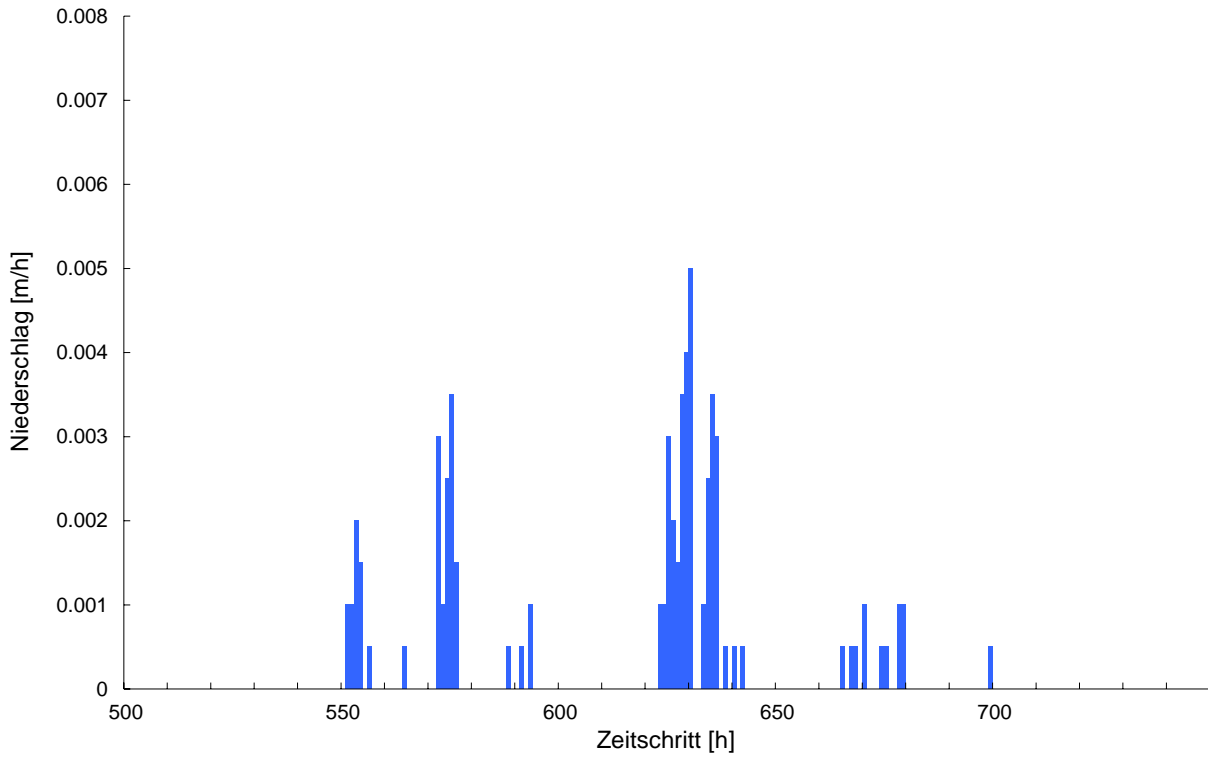
(Blick nach Norden)

**A3: Niederschlagsreihe für TOPMODEL**

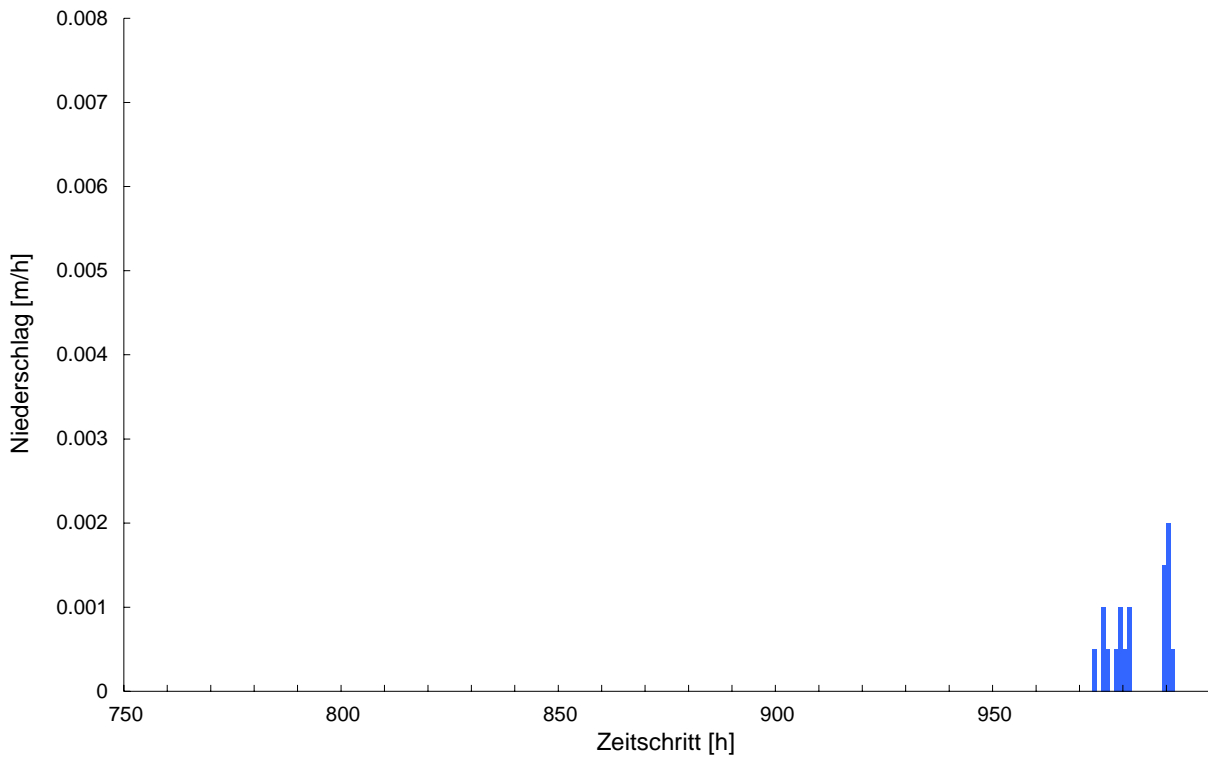
Niederschläge der Zeitschritte 0 bis 249



Niederschläge der Zeitschritte 250 bis 499

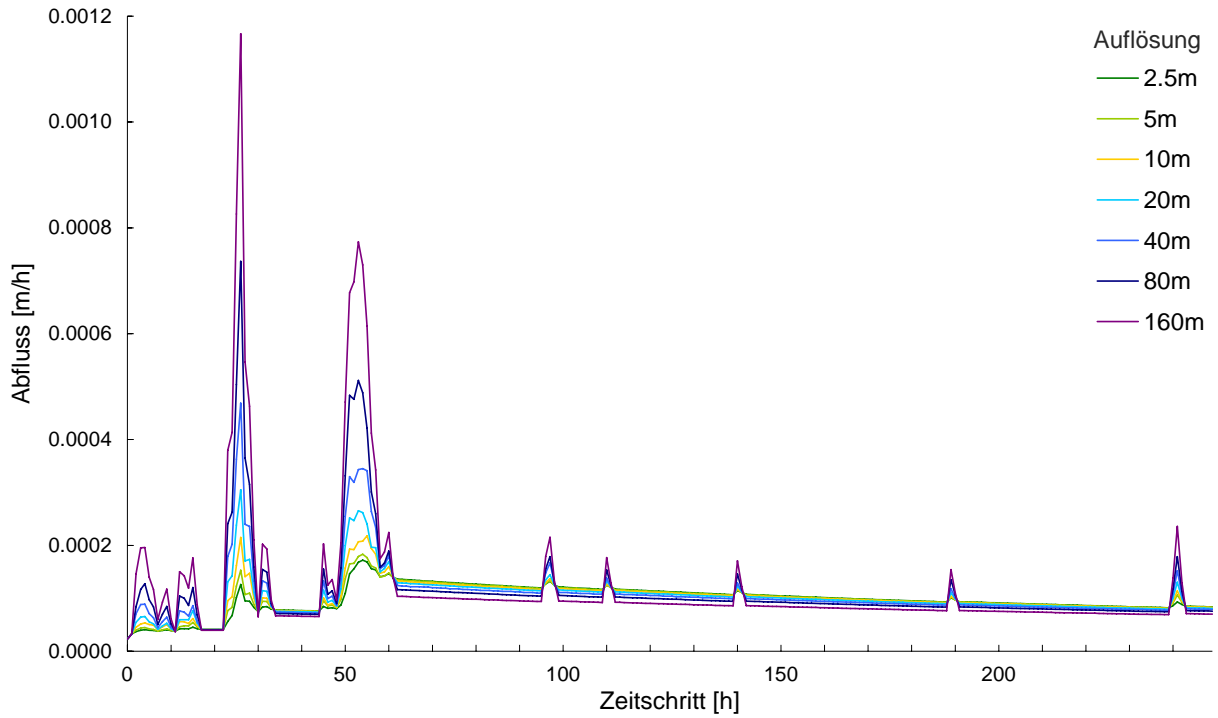


Niederschläge der Zeitschritte 500 bis 749

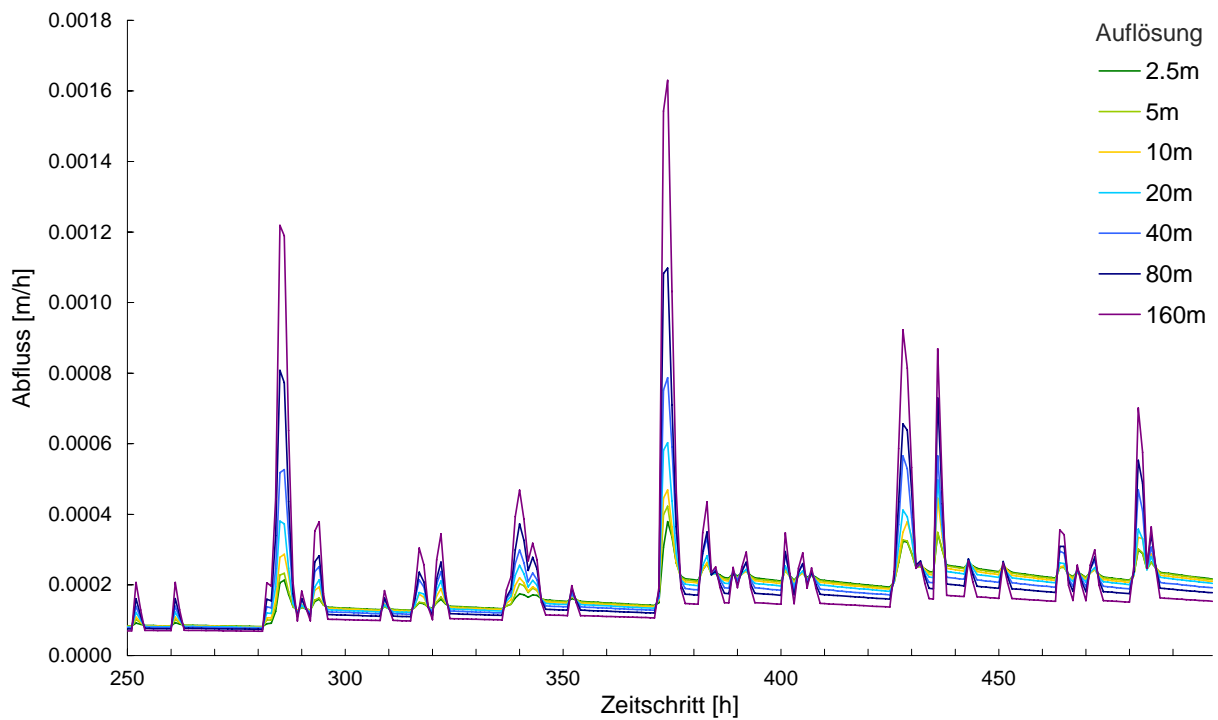


Niederschläge der Zeitschritte 750 bis 999

**A4: Abflussganglinien der TOPMODEL-Modellierung ohne Korrektur**

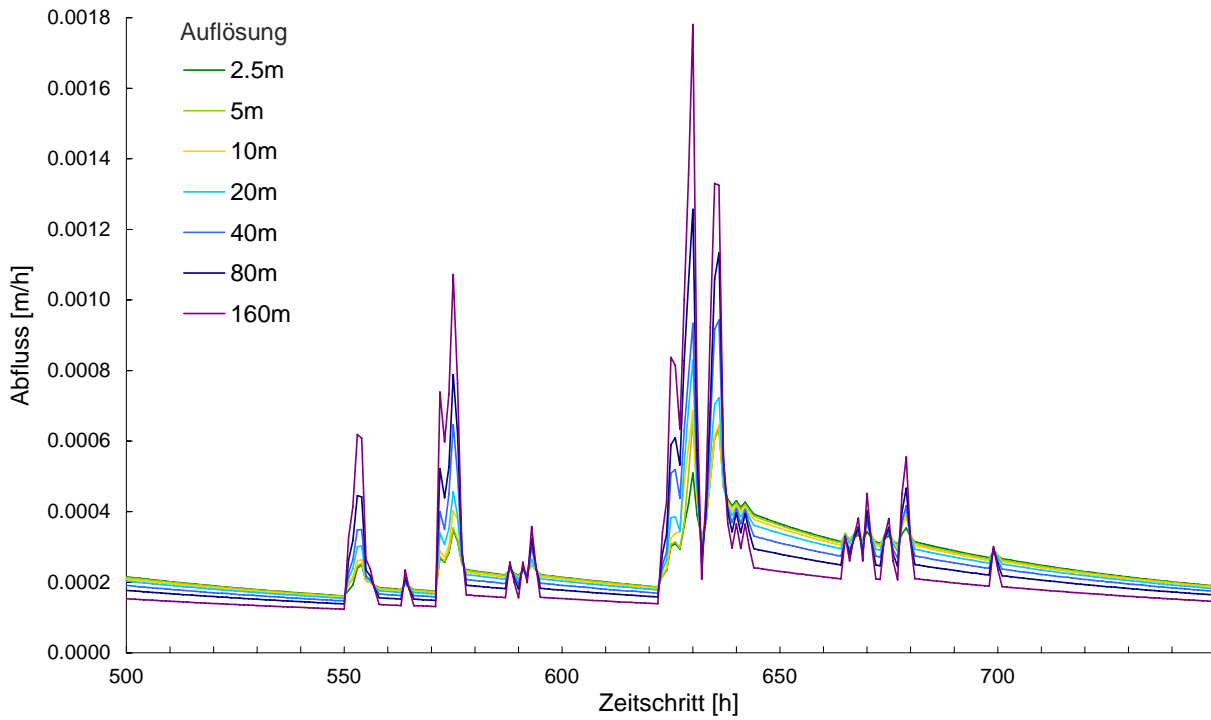


Abflussganglinien der Iterationen 0 bis 249, ohne Korrektur

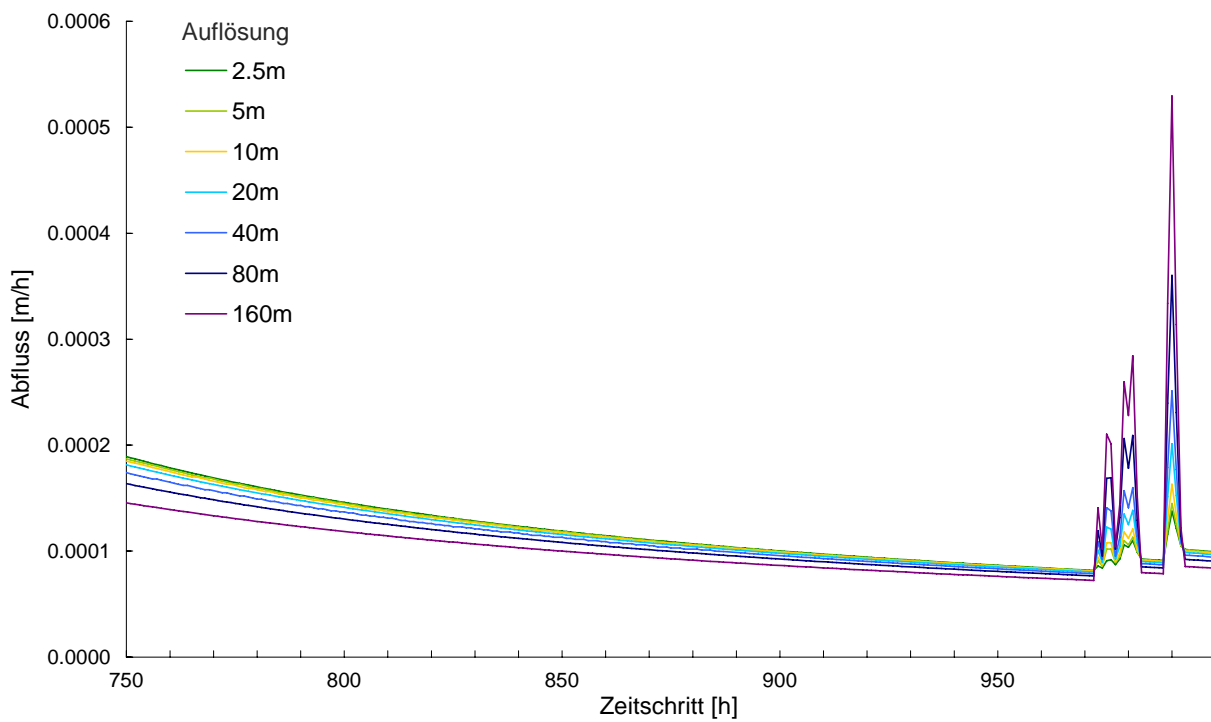


Abflussganglinien der Iterationen 250 bis 499, ohne Korrektur

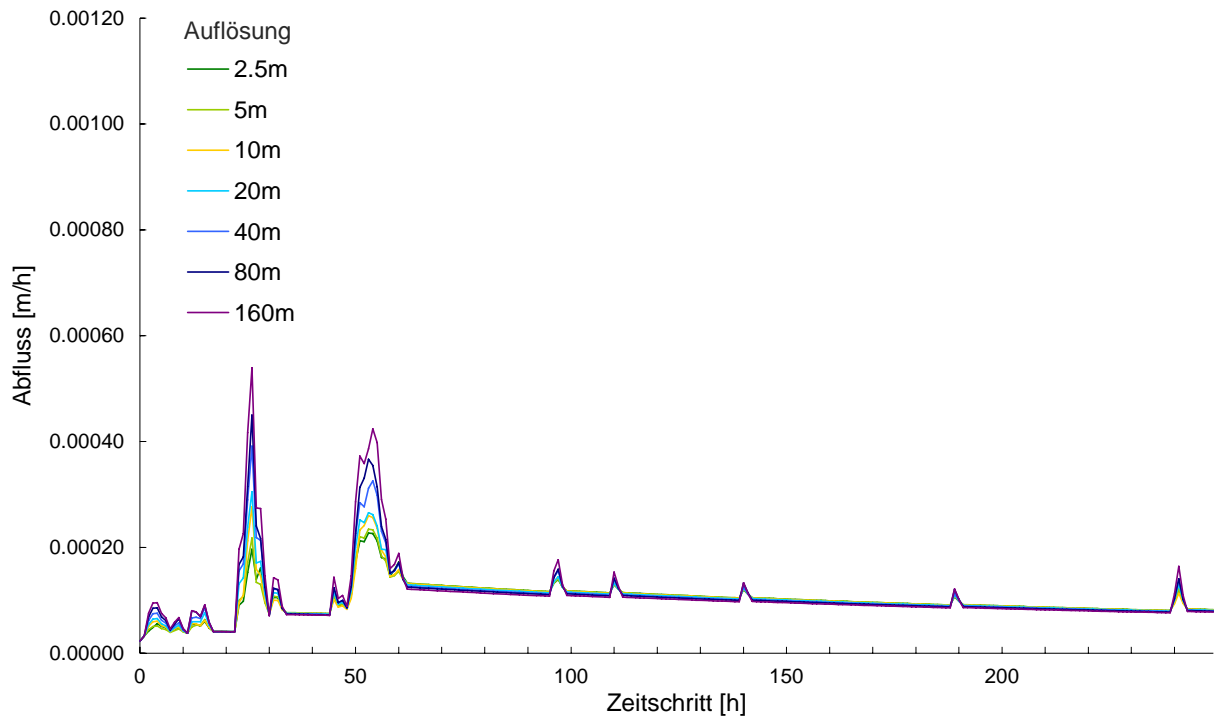
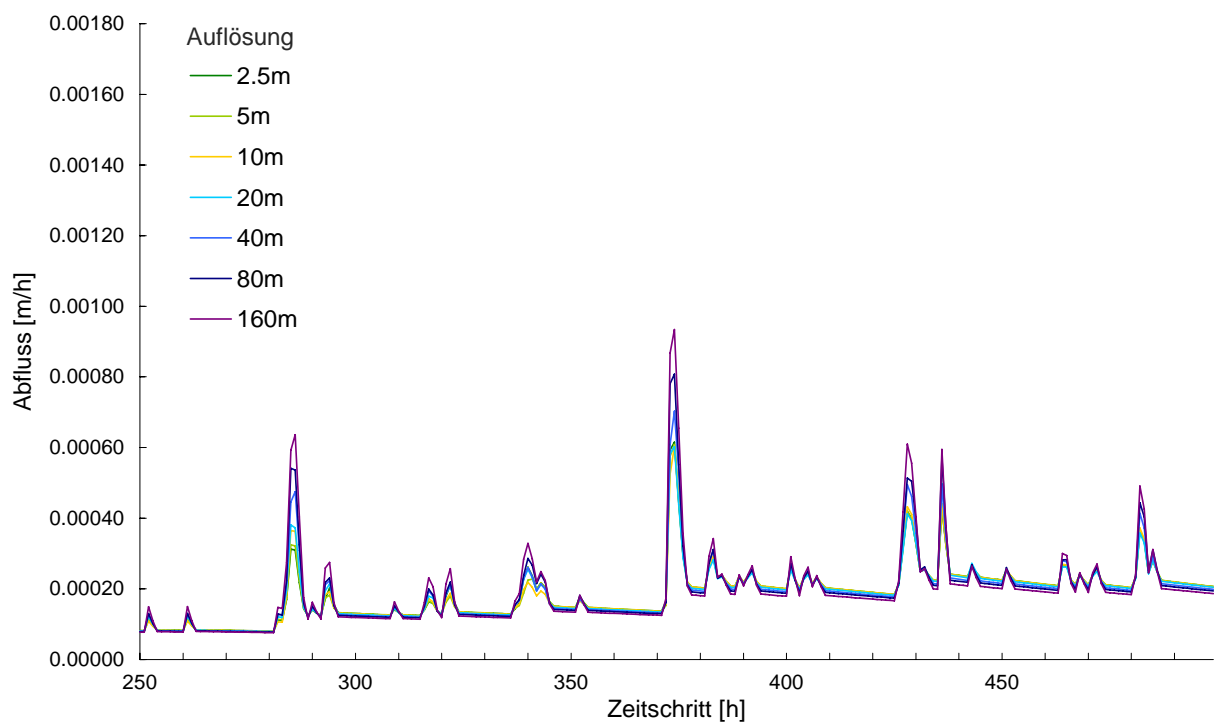


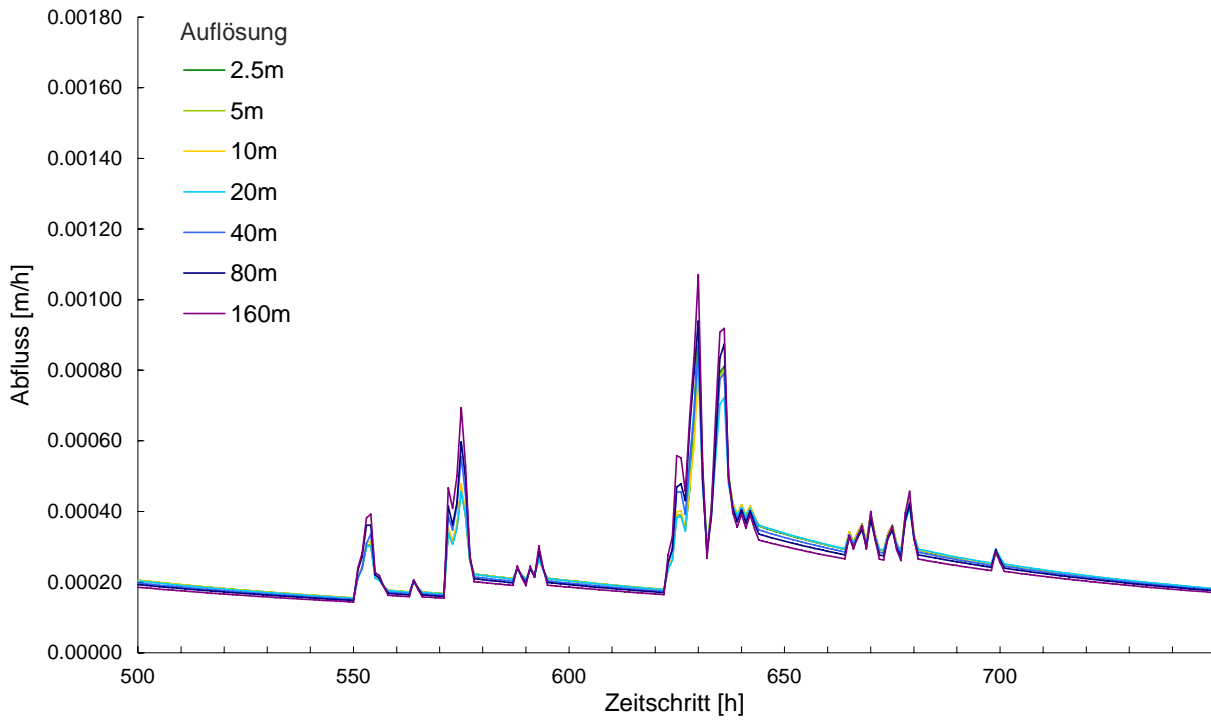


Abflussganglinien der Iterationen 500 bis 749, ohne Korrektur

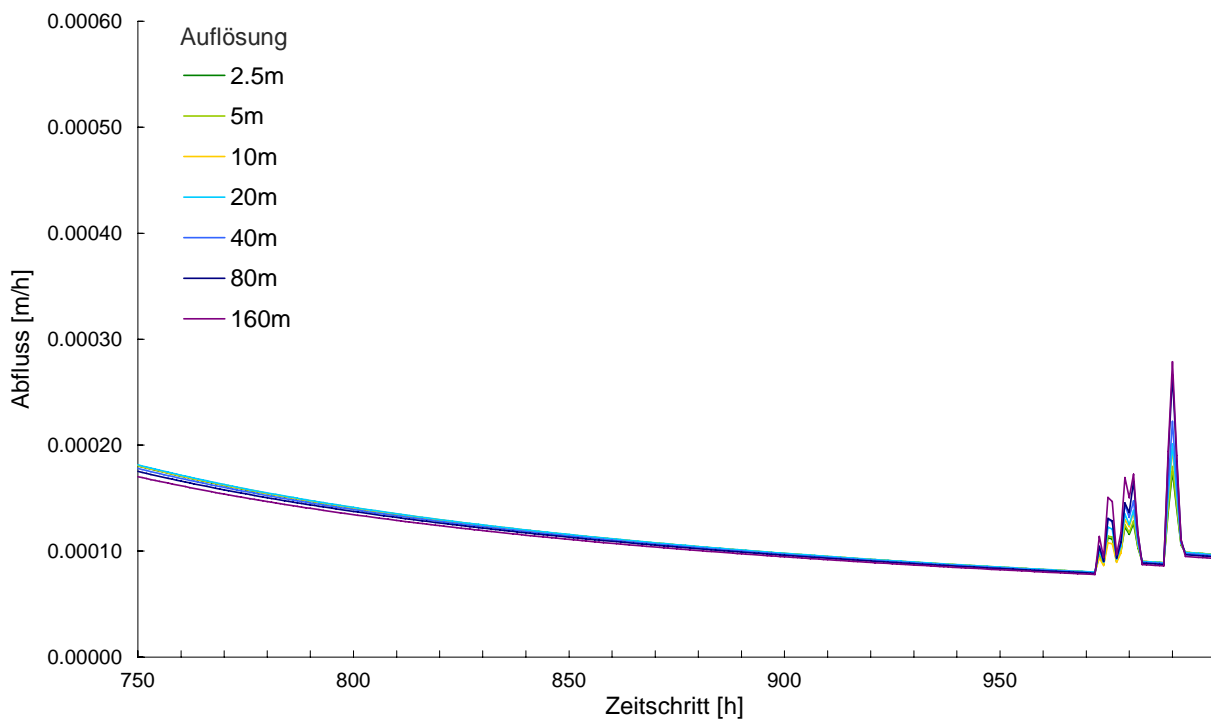


Abflussganglinien der Iterationen 750 bis 999, ohne Korrektur

**A5: Abflussganglinien der TOPMODEL-Modellierung mit Korrektur****Abflussganglinien der Iterationen 0 bis 249, mit Korrektur****Abflussganglinien der Iterationen 250 bis 499, mit Korrektur**



Abflussganglinien der Iterationen 500 bis 749, mit Korrektur



Abflussganglinien der Iterationen 750 bis 999, mit Korrektur