



universität
wien

Diplomarbeit

TITEL DER DIPLOMARBEIT

„Globale Erwärmung – Einsatzmöglichkeiten der Fernerkundung gegen Dürre“

Verfasser

Gregor MITIS

Angestrebter akademischer Grad

Magister der Naturwissenschaften

geschrieben am Institut für Photogram-
metrie und Fernerkundung

eingereicht am Institut für Geographie
und Regionalforschung



Wien, im September 2009

Studienkennzahl lt. Studienblatt:

Studienrichtung lt. Studienblatt:

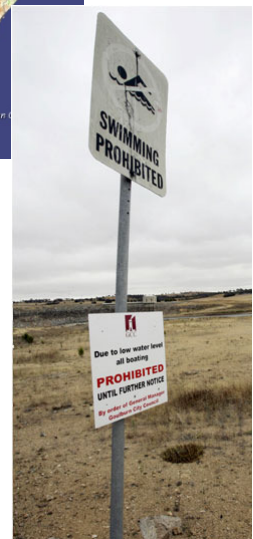
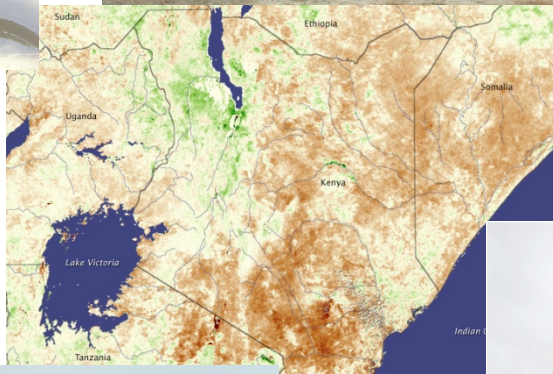
Betreuerin/Betreuer:

A 455

Kartographie und Geoinformation

Univ.Prof. Dipl.Ing. Dr.techn. Wolfgang Wagner

Globale Erwärmung – Einsatzmöglichkeiten der Fernerkundung gegen Dürre



Ich versichere:

- dass ich die Diplomarbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfe bedient habe.
- dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch im Ausland (einer Beurteilerin/ einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe.
- dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

.....

Datum

.....

Unterschrift

Vorbemerkung

Die in dieser Arbeit genannten Inhalte verstehen sich als geschlechtsneutral. Zum besseren Verständnis wurde die übliche Form gewählt, z.B. Einwohner. Gemeint sind damit selbstverständlich auch Einwohnerinnen.

Diese Arbeit baut auf ein Basiswissen der Fernerkundung auf. Dieses läßt sich z.B. durch das Buch „Einführung in die Fernerkundung“ von Jörg Albertz leicht aneignen. Weitere Grundkenntnisse sind unter [URL-01], siehe Internet-Quellen im Anhang, zu finden.

Inhaltsverzeichnis

Vorbemerkung	3
Kurzfassung	7
Einführung	8
1. Globale Erwärmung im erdnahen Raum	9
1.1 Treibhauseffekt	14
1.2 Treibhausgase im Einzelnen	18
1.2.1 Kohlenstoffdioxid	18
1.2.2 Methan	18
1.2.3 Fluorchlorkohlenwasserstoffe	18
1.2.4 Schwefelhexafluorid	21
1.2.5 Ozon	21
1.2.6 Sonstige Treibhausgase	21
2. Gefahren der globalen Erwärmung	22
2.1 Auswirkungen und Gefahren nach Bereichen	23
2.1.1 Wetter	23
2.1.2 Klima	23
2.1.3 Ökosystem	24
2.1.4 Wirtschaft	25
2.2 Beispiele aus der Realität	25
2.2.1 Kiribati	25
2.2.2 Fairbanks	26
2.3 Gefahr am Beispiel der Dürre	26
2.3.1 Eigenschaften und anthropogener Einfluß	26
2.3.2 Erdboden	28
2.3.3 Arten	28
2.3.4 Messung	30
2.3.5 Folgen	32
2.3.6 Maßnahmen zur Linderung	34
2.3.7 Degradation	36
2.3.8 Bodenfeuchte und Bodenwasser	37
2.3.9 Dürrekrisen	39
2.4 Die Gefahren der Klimaveränderung sind vom Menschen beeinflusst	43
3. Maßnahmen mittels Fernerkundung	45
3.1 Was ist die Fernerkundung?	45
3.2 Elektromagnetische Strahlung	46
3.2.1 Veränderung der Strahlen	47
3.2.2 Reflexion am Erdboden	48
3.2.3 Thermalstrahlung	50

3.3	Naturkatastrophen und Fernerkundung	52
3.4	Dürre in der Fernerkundung	55
3.4.1	Natürliche Vegetation	61
3.4.2	Wassergehalt von Pflanzen	64
3.4.3	Vegetationsindizes	65
3.4.4	Leaf Area Index	65
3.4.5	Normalized Difference Vegetation Index	67
3.4.6	Vegetation Condition Index	67
3.4.7	Bodenfeuchte	68
3.4.8	Niederschlag	69
3.5	Radaraufnahme	71
3.5.1	Grundlagen der Aufnahmetechnik	71
3.5.2	Die Reflexion von Mikrowellen	74
3.5.3	Polarisation	78
3.5.4	Objektaussehen im Radarbild	81
3.5.5	Entfernungs- und Azimuthauflösung	85
3.5.6	Radarinterferometrie	88
3.6	Synthetic Aperture Radar	89
3.6.1	Interferometric Synthetic Aperture Radar	90

4. Erfassung von Bodenfeuchtedaten durch das IPF der TU-Wien 91

4.1	ERS 1 und 2	93
4.1.1	Scatterometer	93
4.1.2	Bodenfeuchte-Monitoring im Mikrowellenbereich	94
4.1.3	Weitere Bordinstrumente von ERS	98
4.1.4	Anwendungsbeispiel ERS 1 und 2	99
4.1.5	Datenvergleich mit in situ Messungen	101
4.2	MetOp	102
4.2.1	Advanced Scatterometer	103
4.3	ScanSAR Systems	107
4.3.1	Okavango Delta	108
4.4	Soil Moisture for Hydrometeorologic Applications in the SADC Region	110
4.5	Advanced Microwave Scanning Radiometer-EOS	110
4.6	Interactive Data Language	111

5. Globale Erwärmung – eine internationale Angelegenheit 111

5.1	World Meteorological Organization und Intergovernmental Panel on Climate Change	111
5.2	Internationale Charta für Weltraum und Naturkatastrophen	112
5.3	Zentrum für satellitengestützte Kriseninformation	113
5.4	Klimakonferenzen	113
5.4.1	Kyōto 1997	113
5.5	Notwendige Veränderungen	115
5.5.1	Siedlung und Bebauung	115
5.5.2	Effiziente Energienutzung	116
5.5.3	Sinnvolle Bodenbewirtschaftung	117

Schlußwort	117
Anhang	118
Quellen	118
Abbildungs- und Tabellenverzeichnis	125
Abkürzungen und Fremdbuchstaben	129
Lebenslauf	132

Kurzfassung

Immer wieder tauchen in den heutigen Medien einerseits Berichte über einen Klimawandel oder eine globale Erderwärmung, andererseits über Wetterkapriolen, Hochwässer und im Winter Lawinen auf. Die steigende Schadenssumme von Versicherungen für wetterbedingte Schäden ist ein gutes Indiz, daß derzeit in der Erdatmosphäre Änderungen mit möglicherweise beträchtlichen Auswirkungen, wie manche Wissenschaftler warnen, für unser Leben auf der Erdoberfläche vor sich gehen. Man könnte sich denken, daß geringfügige Änderungen im Erdklima nicht den Bestand unserer Spezies gefährden wird und eher wirtschaftliche Probleme Menschen in eine Existenzkrise treiben. Doch gerade die Agrarwirtschaft hängt essentiell mit dem Klima und dessen Veränderungen zusammen. Wo ein Überschuß an Niederschlag den Boden mit seinen Nährstoffen erodiert oder vermehrter Sonnenschein die Erde vertrocknen läßt, kann keine Pflanze mehr gedeihen.

Der Bürger sollte auch wissen, daß momentan eine globale Erwärmung stattfindet, die anthropogen, mit hoher Wahrscheinlichkeit durch Treibhausgas-Emissionen verstärkt wird und daß diese Gase einerseits eine Lebensdauer von bis zu 3000 Jahren (wie bei Schwefelhexafluorid) haben und andererseits Jahrzehnte brauchen, um sich bodennah auf unser Klima auszuwirken. Wenn auch noch unklar bleibt, wie stark nun der anthropogene Einfluß auf die globale Erwärmung ist, gilt es zu bedenken, daß die Emissionen an Treibhausgasen seit Beginn der Industriellen Revolution im 19. Jahrhundert bis heute massiv gestiegen sind und künftig weitere negative Rekorde brechen werden!

Es ist höchst an der Zeit, die klimatischen Auswirkungen wie Naturkatastrophen im Zuge der globalen Erwärmung zu analysieren. Dürre ist jene, welche die Ernährung des Menschen direkt betrifft. Und Dürre ist eine schleichende Naturkatastrophe, die man noch nicht sicher prognostizieren kann. Die Fernerkundung ist eine wissenschaftliche Disziplin, die hier Abhilfe schaffen kann. Doch wie prognostiziert sie konkret Dürren? Welche Meßgeräte sind in welchen Wellenlängen prädestiniert? Die Forscher am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung (IPF) der TU Wien spezialisierten sich im Bereich Mikrowellen auf Bodenfeuchte, jenen Ansatz, aus dem sich noch am ehesten auf eine möglicherweise bevorstehende Dürre schließen läßt. Die Aufnahme eines räumlich vom Meßgerät entfernten Objekts geschieht

heute üblicherweise per Satellit, von dem aus Meßgeräte wie ein Scatterometer oder das Verfahren ASAR Bodenfeuchte über große Flächen messen kann. Dazu werden in dieser Arbeit andere fernerkundliche Verfahren erwähnt, als auch in situ Messungen. Vegetationsindizes sind ein Maß, das auf die Gesundheit eines Vegetationsbestandes schließen läßt und ebenso wie Bodenfeuchte mittels Fernerkundung gewonnen wird, um Dürre mittels wichtiger Parameter zu beobachten. Der technische Fortschritt ermöglicht immer spezifischere Daten, was der Analyse von Dürre zu Gute kommt und vielversprechend für die Zukunft ist.

Die Diplomarbeit schließt mit einem Blick auf internationale Organisationen, die sich der globalen Erwärmung durch Vereinbarungen widmen, die v.a. die Treibhausgasemissionen reduzieren sollen. In der Tat ist die globale Erwärmung ein Phänomen das international geschieht und daher alle angeht.

Einführung

Ozonloch, Klimawandel, Unwetter, die Schlagzeilen in unseren Medien enthalten immer häufiger Begriffe dieser Art. Die Erklärungen zu Hitzewellen oder Unwettern mit Hagel greifen oftmals zu kurz. Denn spätestens wenn der Klimawandel durch das Ozonloch erklärt wird, muß eingeschritten werden. Denn mit solch falschen Darstellungen wird den Klimasündern so schnell nicht das Handwerk gelegt werden können. Und sind diese Sünden wirklich so stark, daß der Mensch erstmals in seiner Geschichte dabei ist, das Weltklima zu ändern? Passieren tatsächlich immer öfter Naturkatastrophen wie etwa *Dürre*?

Für Klimaforscher weltweit sind Satellitenbilder für ihre Arbeit unerläßlich geworden. Immer leistungsfähigere Geräte werden an Satelliten ins All geschossen um noch genauere Daten der Atmosphäre und Erdoberfläche zu gewinnen. Dieses Prinzip, die Trennung zwischen Meßgerät und Meßobjekt, ist die Grundlage der Fernerkundung, ein nicht nur der Meteorologie seit Jahrzehnten dienendes, wissenschaftliches Gebiet. Zur Fernerkundung zählt aber nicht nur die Datenerfassung, sondern auch die Verarbeitung und Interpretation der gewonnenen Daten. Für den derzeitigen Klimawandel ist sie ein prädestiniertes Instrument. Gilt dies auch für Dürre die sich auch unter der Erde abspielt? Wie weit ist die Technik der Fernerkundung hier

fortgeschritten? Diese Arbeit zeigt auf, wie detailliert die, über hunderte Kilometer Entfernung, aufgenommenen Daten sein können. Es wird erläutert, wie sie zur Beobachtung der Veränderungen des Erdklimas eingesetzt werden können.

1. Globale Erwärmung im erdnahen Raum

Der Begriff *globale Erwärmung* wurde in den 1980ern geprägt und meinte einst die ursprünglichen Veränderungen des Klimas auf der Erde. Vom in aller Munde befindlichen Begriff des *Klimawandels* muß er unterschieden werden. Denn ein schwankendes, sich wandelndes Klima gab es in der gesamten Erdgeschichte, z.B. die Eiszeitalter. Weitere Beispiele für einen solchen natürlichen Klimawandel sind, für lange Perioden die Kontinentaldrift, für kurze - ein paar Jahre - Vulkanausbrüche, weiters die Milanković-Zyklen sowie Änderungen der Solar-energie. Globale Erwärmung meint heute die anthropogen beeinflusste, durchschnittliche Erhöhung der Temperatur in der erdnahen Atmosphäre in den letzten Jahrzehnten sowie die künftig steigende Erwärmung, vergleiche Abbildung 1. Erdnahe Atmosphäre meint die Luft-hülle, welche sich von der laminaren Unterschicht (vom Erdboden bis wenige Zentimeter darüber) bis zur Grenze der Troposphäre an die Stratosphäre, der Tropopause, erstreckt. Wie in dieser Arbeit angeführt, gibt es auch anthropogene Einwirkungen, die zu einer Abkühlung der globalen Durchschnittstemperatur führen. Insgesamt läuft die Klimabeeinflussung des Menschen jedoch auf eine Erwärmung hinaus. Die 1990er Jahre waren offensichtlich das wärmste Jahrzehnt des zweiten Jahrtausends n. Chr. [CUB-00] Ursache ist nach derzeitigem Wissen sehr wahrscheinlich der anthropogen verstärkte, natürliche Treibhauseffekt.

Unsere Welt wird wärmer

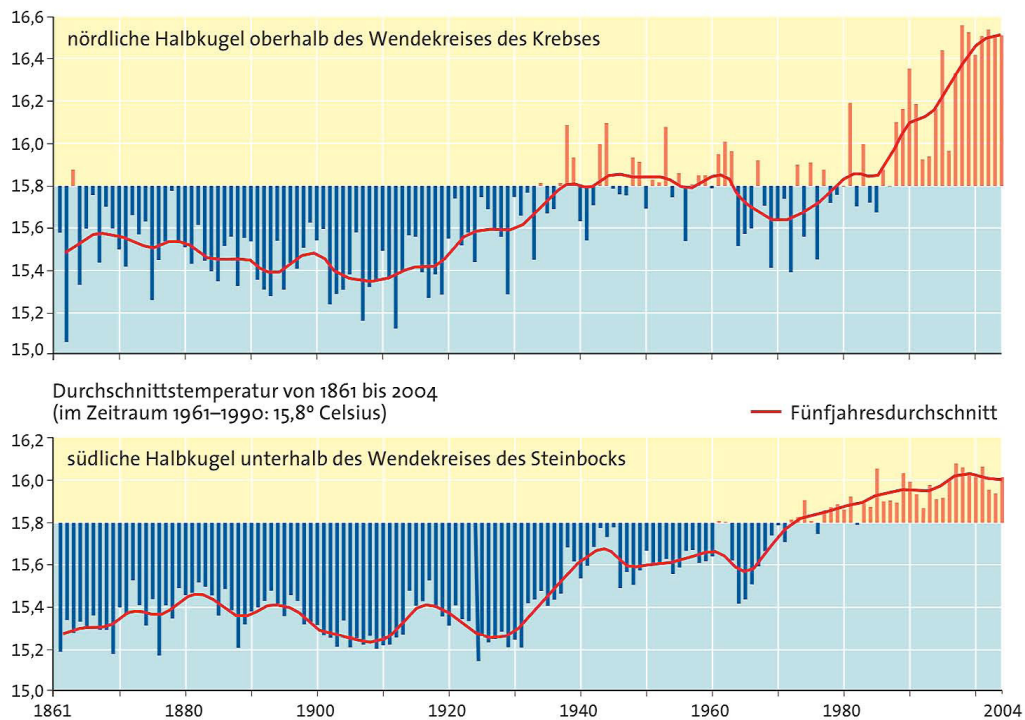


Abb. 1

Eine Erwärmung ist also nur durchschnittlich vorhanden, mit der globalen Erwärmung gehen weit mehr Prozesse einher. Darunter fallen z.B. häufigere Wetterextreme, die in ihrer Intensität zulegen. Der geschlossene, beschleunigte Wasserkreislauf ist hierfür ein gutes Beispiel. Verdunstung und Kondensation vollstrecken sich aber nicht nur schneller, ihre Intensität variiert auch regional stärker. Die Erwärmung bewirkt eine höhere Evapotranspiration (Verdunstung auf Erd- und Wasseroberflächen – Evaporation zusammen mit der Verdunstung durch Pflanzen – Transpiration) und in Folge mehr Niederschläge. Unter diesen fällt natürlich auch Schneefall – ein Argument das gerne angeführt wird, wenn dem Abschmelzen der globalen Eismasse widersprochen wird. Tatsächlich gibt es Regionen, die mehr Schneefall im Jahr erhalten als früher, genauso wie es Gebiete gibt, die eine Abkühlung gegenüber vergangener Jahre erfahren werden, vergleiche dazu Abbildung 2 am Beispiel der Antarktis. In der Stratosphäre findet eine Abkühlung, mittlerweile durch Messungen belegt, statt. Es wurde dort eine Temperaturabnahme von $0,314^{\circ}\text{C}$ in den letzten 30 Jahre erhoben. [URL-08]

Doch insgesamt kommt es im Durchschnitt zu einer Erwärmung sowie einem Verlust an Eis und Schnee im Zuge eines beschleunigten Wasserkreislaufes. Trotz der Tatsache, daß im Meer befindliches Eis, wie z.B. Eisberge oder die Arktis, den Meeresspiegel bei Schmelze nicht erhöhen, steigt dieser dennoch, da u.a. die Eismassen der Antarktis sowie Grönland auf Festland liegen. Die Niederschläge fallen auch zunehmend variabel aus. Regenschauer, also regionaler Regen kurzer Dauer mit rasch abwechselnder Intensität, treten häufiger auf. [URL-07] Ebenso kommen Starkregen so wie Dürreperioden öfter vor. Dabei muß angemerkt werden, daß ein Begriff wie Dürre regional eine unterschiedliche Bedeutung hat. Temperaturen einer Dürre in Mitteleuropa stellen für die Halbwüste Nordafrikas eine solche nicht dar. Räumliche Differenzen für Dürre gelten auch, weil Völker sie anders definieren aber v.a., da die Vegetationen der Klimazonen den jeweiligen Bedingungen angepaßt sind. Sukkulente wie Kakteengewächse, als Beispiel für xeromorphe Pflanzen, bestehen über längere Trockenperioden und manche Agrarprodukte entstammen Pflanzen, die sogar entsprechend warme Temperaturen benötigen, wie die Kaffeepflanze oder der Kakaobaum. Aber auch manche Naturkatastrophen wie Überschwemmung sind nicht a priori eine Gefahr für den Menschen. Gebiete wie das Nildelta profitierten von einer periodischen Überflutung und machten das Land durch den nach der Flut zurückbleibenden Schlamm fruchtbar. Dies gilt deshalb heute nicht mehr, weil der Assuan-Staudamm den Flußlauf reguliert, wodurch noch mehr Fläche landwirtschaftlich bewirtschaftbar wird sowie Wasser für Trockenperioden gespeichert werden kann.

Temperaturänderungen in der Antarktis bis 2050

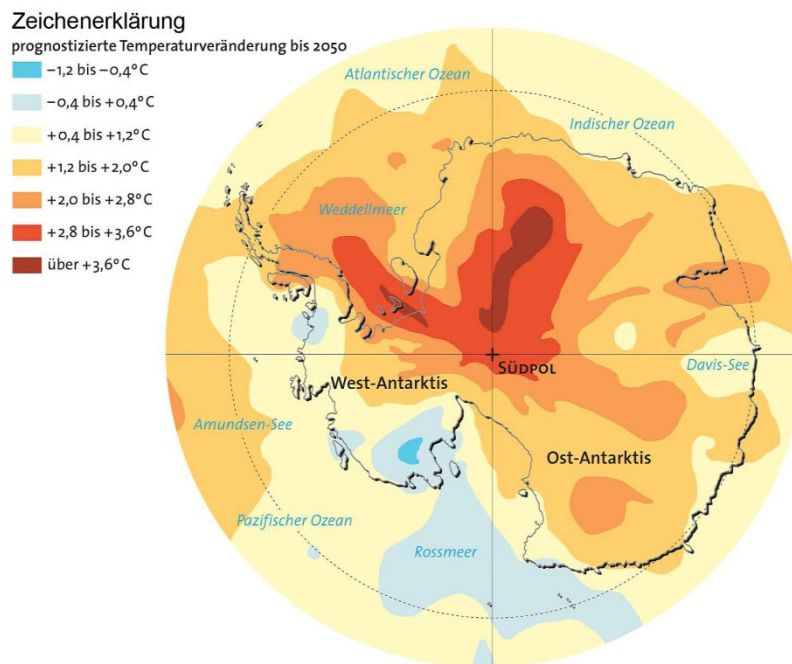


Abb. 2

Doch für Bauwerke solcher Größenordnung fehlt vielfach das Geld und Wissen. Vor allem Völker in den Entwicklungsländern haben zunehmend mit unfruchtbaren Böden zu kämpfen, da dort mehr Umweltverschmutzung vorherrscht als im reichen Westen. In den vergangenen 35 Jahren produzierte z.B. die Ölindustrie in Nigeria über sieben Mio. Kubikmeter Bohrrückstände, die in der unmittelbaren Nachbarschaft der Produktionsstandorte deponiert wurden. [WER-01] Die Auswirkungen der globalen Erwärmung machten sich in den Ländern der Dritten Welt auch deshalb als erstes bemerkbar, da die vor Naturkatastrophen schützende Infrastruktur unzureichend ist. Diese Probleme zwingen die Bewohner, neben der Aridität, dem Anstieg des Meeresspiegels, Eisschmelze, Erdbeben und nicht zuletzt aufgrund ihrer Armut immer häufiger zu migrieren. Derzeit sind weltweit über 20 Mio. Menschen auf der Flucht aus ihrer Heimat, die durch Klimaveränderungen unbewohnbar wurde. [WER-08] Ob sie in den großen Flußdeltas des Nil, des Mekong, des Ganges oder des Brahmaputra leben oder in den Küstengebieten im Süden der Vereinigten Staaten, auf Inselgruppen wie den Atollen im Pazifischen oder Indischen Ozean oder an den Rändern der Wüsten, etwa im Umkreis des Tschadsees oder in der Peripherie von Peking – sie werden ihren Lebensraum verlassen müs-

sen. [LeM-08] In Indonesien müssen die Bewohner in den Dörfern nahe der Hauptstadt Jakarta bereits mehrmals pro Jahr ihre Dörfer in Richtung höher gelegener Orte verlassen. Das Gebiet um die Sechzehn-Millionen-Metropole liegt zum Großteil nur auf Meereshöhe. [ANS-07] In anderen Megastädten wachsen die Slums durch Klimaflüchtlinge. Besonders das bevölkerungsreiche, südasiatische Land Bangladesch ist von Klimaveränderungen betroffen. Im Deltabereich der Flüsse Brahmaputra, Ganges und Meghna gelegen, ist es durch seine niedrige Lage, die Hauptstadt Dhaka liegt im Durchschnitt sechs Meter über Normalnull (NN), für Überschwemmungen sehr anfällig. Hinzu kommt das aus dem Himalaya abfließende glaziale Schmelzwasser und die Regenfälle des schwankenden Monsuns. Dennoch sucht auch Dürre den von Krisen gebeutelten Staat heim, ebenso wie die im April/Mai sowie Oktober/November aus der Bucht von Bengalen wiederkehrenden Zyklone. Und wohin können die daraus resultierenden Klimaflüchtlinge auswandern? Den Nachbarstaaten Indien und Myanmar drohen ähnliche Gefahren durch das Klima und ferner lehnen die Immigranten aus Bangladesch diese Staaten aus historischen Gründen ab. Dasselbe gilt für Völker in Afrika nahe der Sahel-Zone sowie Lateinamerika. Einen Überblick drohender Naturkatastrophen in der Welt durch u.a. den steigenden Meeresspiegel bietet Abbildung 3.

Durch globale Erwärmung derzeit gefährdete Gebiete

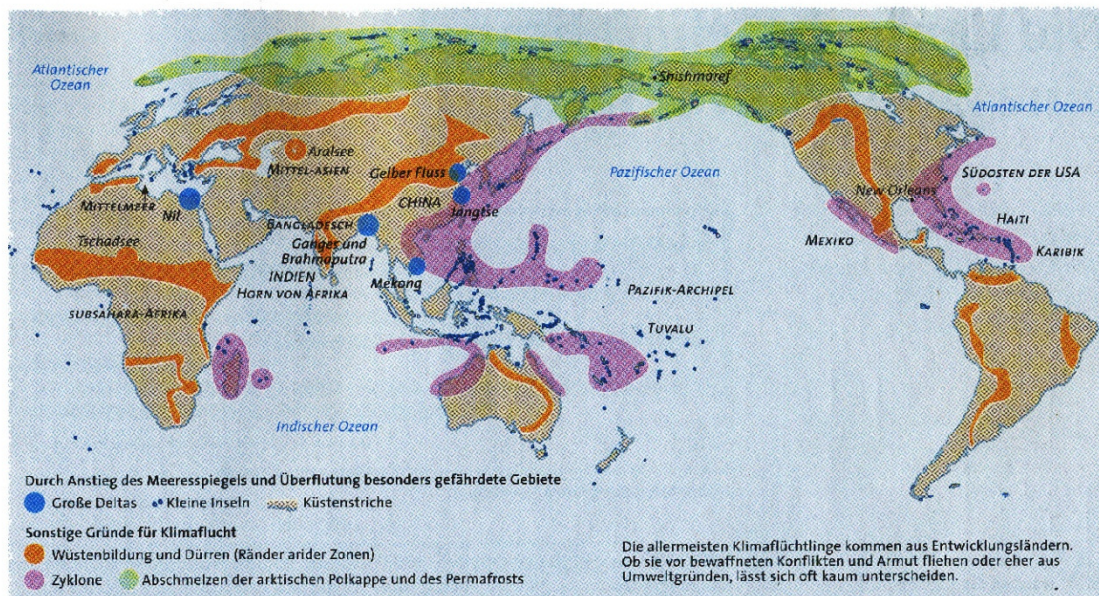


Abb. 3

Da das komplexe System Erdklima aus mehreren zusammenhängenden Faktoren besteht, sind einerseits Prognosen nie zu 100 Prozent richtig, andererseits Eingriffe nicht unmittelbar zu spüren. Das heutige Klima ist das Resultat u.a. der Treibhausgas-Emissionen von vor vielen Jahren. Das gleiche gilt für natürliche Veränderungen. Da die momentane globale Erwärmung vom Menschen noch verstärkt wird, ist künftig mit heftigeren klimatischen Veränderungen zu rechnen. Es wird Jahrzehnte und, beim Anstieg des Meeresspiegels, sogar Jahrhunderte dauern, bis der Klimawandel abgeschlossen ist. Derzeit sind nicht einmal alle Folgen der Treibhausgas-Emissionen aus den 1960er Jahren sichtbar. [MÜL-07]

1.1 Treibhauseffekt

Jedes Objekt auf der Erde absorbiert die Sonnenstrahlung und gibt einen Teil davon langwellig (8 bis 15µm) wieder ab. Die in der Atmosphäre befindlichen Treibhausgase wirken für Strahlen dieser Wellenlänge aber als Barriere, weshalb sie sie zur Erdoberfläche gegenstrahlen. Dabei reflektieren sie die langwellige Strahlung nicht unmittelbar, sondern oft erst nach Jahren. In Relation zu einem Treibhaus, das der Pflanzenkultivierung dient und von dem der Begriff stammt, entsprechen die Treibhausgase der Atmosphäre dem Glas, welches das Dach und die Mauern des Treibhauses bildet.

Ohne diesen natürlichen Treibhauseffekt wäre ein Leben auf der Erde nicht möglich, da eine Durchschnittstemperatur von -18°C herrschte. Seine durch den Menschen verursachte Verstärkung birgt jedoch Gefahren. Die zunehmende Emission an Treibhausgasen wie CO₂ bewirkt eine höhere Gegenstrahlung in der Atmosphäre zur Erde und somit eine Erwärmung. Diese ist also weder von mehr Sonnenstunden bedingt, noch durch die Geothermie. Letztere bezeichnet jene von der Erde abgestrahlte Wärme, die ihren Ursprung im Erdinneren hat. In der folgenden Tabelle werden die wichtigsten Treibhausgase der Erdatmosphäre samt verschiedener, klimatisch bedeutsamer Eigenschaften – diese sind den Folien zu [BAR-08] entnommen – sowie anthropogenen Quellen angeführt.

Anthropogene Treibhausgase – Quelle, Lebensdauer und heutige Konzentration in der Atmosphäre

Treibhausgas	Anthropogene Quelle	
Wasserdampf (H ₂ O)	Viele verschiedene	
Kohlendioxid (CO ₂)	Fossile Brennstoffe, Herstellung von Bindemitteln, Veränderungen der Landnutzung	
Methan (CH ₄)	Fossile Brennstoffe, Viehbestand, Reisfelder, Müllhalde	
Distickstoffmonoxid oder Lachgas (N ₂ O)	Düngemittel, Verbrennung in der Industrie	
Fluorchlorkohlenwasserstoffe (diverse Moleküle)	Elektrogeräte, Kühlschränke, industrielle Produktion, z.B. von Aluminium	
Schwefelhexafluorid (SF ₆)	Dielektrische Flüssigkeiten	
Ozon (O ₃)	u.a. durch Verbindung von Stickoxiden und Kohlenwasserstoffen mit der UV-Strahlung	
Treibhausgas	Lebensdauer	Heutige Konzentration in der Atmosphäre
Wasserdampf (H ₂ O)	Ein paar Tage	2ppm
Kohlendioxid (CO ₂)	120 Jahre mit hoher Schwankungsbreite	380ppm
Methan (CH ₄)	12 Jahre	unter 2ppm
Distickstoffmonoxid oder Lachgas (N ₂ O)	114 Jahre	320ppb
Fluorchlorkohlenwasserstoffe (diverse Moleküle)	1 bis 260 Jahre	3 bis 540ppt
Schwefelhexafluorid (SF ₆)	3.200 Jahre	5ppm
Ozon (O ₃)	Stunden bis Tage	34ppb

Tab. 1

ppb parts per billion

ppm parts per million

ppt parts per trillion

Die Konzentrationen variieren mit jeder Quelle, als auch mit geographischem Breitengrad, Höhe über der Erdoberfläche sowie Temperatur, die Emissionen sehr stark zwischen industrialisierten und armen Ländern. Daher dienen diese Zahlen nur, um sich einen Überblick zu verschaffen. Ihre Aussagekraft ist beschränkt.

Die Temperaturänderung über der Erdoberfläche kann auch anderweitig bedingt sein. So kann z.B. Sonnenaktivität sich erwärmend auswirken. Auch in der Atmosphäre befindliche Feststoffe, Aerosole, nehmen Einfluß auf die Temperatur. Die Sonnenstrahlung wird seit Ende der 1970er von Satelliten beobachtet. Ergebnisse lassen eher auf eine Abnahme der Einstrahlung auf die Erde schließen. Aerosole kühlen sogar das Klima am Erdboden, da die Sonnenstrahlen auf ihnen reflektieren, bevor sie die Erdoberfläche erreichen. Zwischen 1950 und 1975 verdoppelte sich der Ausstoß von Sulfaten von etwa 35 auf über 70 Mio. Tonnen jährlich, um dann zunächst auf diesem Niveau zu verharren und ab Ende der 1980er Jahre wieder zu fallen. 2000 lag der Sulfatausstoß bei etwa 55 Mio. Tonnen. [URL-36] Mit Zunahme der Sulfatkonzentration in der Atmosphäre ging eine Dämpfung der globalen Erwärmung einher, durch ihre Abnahme stieg die Temperatur auf der Erde stärker an.

Aus globaler Sicht ist erkennbar, daß die Temperatur der erdnahen Atmosphäre auf der Nordhalbkugel in den letzten hundert Jahren stärker zunahm, als auf der Südhalbkugel. Bedingt wird dies durch die raschere Erwärmung der Luft über Festland, das ja v.a. in der nördlichen Hemisphäre gelegen ist, gegenüber dem Wasser, das infolge der Erwärmung stärker verdunstet, dadurch eine Abkühlung erfährt und sich langsamer erwärmt. Im beschleunigten Wasserkreislauf dürften die Verdunstung v.a. in den Subtropen und der Niederschlag in den höheren Breiten zulegen. [CUB-00] Weiters ist im Durchschnitt global eine etwas stärkere Erhöhung der Temperatur in den Wintermonaten, Nächten und auf höher gelegenen Gebieten gegenüber dem Sommer, den Tagen und Tälern beobachtbar. Besonders markant fiel die Erwärmung in der Arktis aus, wo sie im jährlichen Mittel etwa doppelt so hoch ist wie im globalen Durchschnitt. [URL-05] Im Zuge der globalen Erwärmung ist ein zeitlich verändertes Auftreten der Jahreszeiten in klimatischer Hinsicht bereits ersichtlich. Im Durchschnitt beginnt der Frühling um zwei Wochen früher, wie beispielsweise das Wanderverhalten von Zugvögeln zeigt. [URL-11] Weitere Gründe sind die verfrühte Blattentfaltung und Blüte. Im

Gegensatz dazu verfärben sich die Blätter im Herbst immer später. Insgesamt verlängert sich also die Vegetationsperiode, wobei regionale Unterschiede beachtet werden müssen.

Für jeden Punkt der Erde gilt, daß er heute jenes veränderte Wetter hat, das durch Treibhausgas-Emissionen von vor 20, 30 Jahren beeinflußt wurde. Die Auswirkungen der das Klima beeinflussenden Gase, entstehen also mit großer Zeitverzögerung. Die Folgen der momentanen, höchsten Treibhausgas-Emissionen bisher, sind erst in ein paar Jahrzehnten wahrzunehmen. Ursache ist die Lebensdauer der Treibhausgase in der Atmosphäre. Diese absorbiert die Gase zunächst, um sie erst nach einiger Zeit (bei Wasserdampf nach ein paar Tagen, bei Lachgas erst nach über hundert Jahren) wieder abzugeben.

Auch wenn wissenschaftlich eine Erwärmung des menschlichen Lebensraums in Folge der Industrialisierung grundsätzlich erwiesen ist, so muß erwähnt werden, daß das Wissen wie und wo eine solche geschieht beschränkt ist und oft nicht verifiziert werden kann. Auch das Wissen darüber, ob derzeit ein natürlicher Klimawandel geschieht, der anthropogen verstärkt wird und wie sehr dieser Einfluß tatsächlich passiert ist nicht gesichert. Hier gehen die Meinungen in der Wissenschaft auseinander. Cubasch spricht sogar von einer Wahrscheinlichkeit von mehr als 95 Prozent, daß zwischen 1966 und 1998 die Temperaturerhöhung um $0,4^{\circ}\text{C}$ über der natürlichen Variabilität des Klimas liegt. [CUB-00] Der Winter 2006/07 der Nordhalbkugel verlief vielerorts ausgesprochen mild. Die National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) erklärte ihn sogar zum wärmsten aller Zeiten. [ANS-07] Regionale Vorhersagen sind schwieriger als globale zu treffen, daher sei hier Vorsicht geboten.

Besonders Rückkoppelungseffekte, die den Grad der globalen Erwärmung deutlich beeinflussen können, sind nicht gänzlich erforscht. Die zunehmende Temperatur der Meere senkt das Aufnahmevermögen an CO_2 . Weniger Absorption erhöht den Treibhauseffekt und der wiederum eine Erwärmung der Gewässer, ein Teufelskreis. [LeM-08]

V.a. Modelle der Zukunft über z.B. Treibhausgas-Emission müssen eine Großzahl an Faktoren einbeziehen, deren Einschätzung schon einer gewissen Unsicherheit obliegt: Entwicklung der Weltbevölkerung, verwendete Energieträger, Bruttosozialprodukt sowie Änderung der Solarstrahlung, Folgen von Vulkanausbrüchen oder ozeanische Zirkulation.

1.2 Treibhausgase im Einzelnen

1.2.1 Kohlenstoffdioxid

Das durch anthropogene Verbrennung fossiler Brennstoffe wie Kohle, Erdöl und Erdgas emittierte Treibhausgas CO_2 wird nur zur Hälfte von der Biosphäre und den Ozeanen absorbiert, bedingt durch die Abholzung des Menschen, weshalb Wälder gerne auch Kohlenstoffdepotien genannt werden. Zwar sind die jährlichen anthropogenen Emissionen an CO_2 mit 36,3Gt deutlich geringer als jene aus natürlichen Quellen mit 550Gt, aber eine Entwaldung hat noch mehr Probleme in der Natur zur Folge. Durch den fehlenden Wasserleiter für den Boden erhöht sich der Abfluß und damit die Erosion. Das abgetragene Material kann in Gewässern zur Verlandung und in Ozeanen zum Erstickten von Korallen führen.

1.2.2 Methan

Ein weiteres Beispiel dessen Auswirkungen man für die globale Erwärmung noch nicht genau abschätzen kann, ist das aus dem auftauenden Permafrostboden entweichende Treibhausgas Methan. Besonderes Augenmerk gilt hier dem westsibirischen Permafrost mit 70 Mrd. gespeicherten Tonnen, das entspricht einem Viertel der Weltbestände. [URL-09] Weltweit werden schätzungsweise jährlich 500 Mio. Tonnen Methan emittiert, etwa 70 Prozent davon sind auf Aktivitäten des Menschen zurückzuführen. [URL-07] Diese Zahlen zeigen, welche riesige Menge noch im Permafrostboden steckt und zu entweichen droht. Die mit dem Auftauen einhergehenden Gefahren zeigt das in Kapitel 2.2.2 beschriebene Beispiel von Fairbanks. Weitere Quellen von Methan sind Viehhaltung, z.B. Rinder, und bebauter Boden, etwa der Naßreisbau.

1.2.3 Fluorchlorkohlenwasserstoffe

In den 1980ern setzte sich in der Industrie der Gebrauch des Gases FCKW durch, da es weder riecht noch brennt und somit für technische Anwendungen prädestiniert war. Es fand Verwendung in Kühlgeräten, Sprühdosen, Feuerlöschern und anderem. Der Nachteil dieses Treibhausgases wurde erst erkannt, als Satellitenbilder eine Ausdünnung der lebensnotwendigen, weil die für den Menschen gefährliche UV-Strahlung der Sonne absorbierenden, Ozon-

schicht, gelegen in der Stratosphäre, zeigten. Die auf der Erdoberfläche freigesetzten FCKW-Moleküle steigen auf, bis sie in einer Höhe zwischen 15 bis 50km durch Sonnenstrahlen gespalten werden, ein Prozeß der bei den momentanen FCKW-Konzentrationen noch 50 bis 100 Jahre dauert. Das dadurch freigesetzte Chloratom ist gegenüber dem Ozon, O_3 , sehr reaktionsfreudig, weshalb es dieses in O- und O_2 -Moleküle trennt. Dieser Abbau, vor allem über der Antarktis und später über der Arktis, wurde allgemein unter dem Begriff Ozonloch bekannt. UV-Sonnenstrahlen, also kurzwellige ultraviolette, verursachen beim Menschen Augenkrankheiten wie z.B. Katarakt und Hautkrebs. Auf dem Klimagipfel in Montreal 1987 wurde ein generelles Verbot für Produktion und Einsatz von FCKW beschlossen, das 1990 in Kraft trat und seine Wirkung nicht verfehlte. Tatsächlich sank der Ozonabbau in der Stratosphäre, siehe dazu Abbildung 4. Dies, obwohl das noch stärker Ozon spaltende, in u.a. in Entwicklungsländern als Pflanzengift eingesetzte, Methylbromid weiter verbraucht wird. 2004 sollen allein in Kalifornien immer noch 35.000 Tonnen verwendet worden sein. [LeM-08] Zwar gibt es auch Pflanzen, wie die Kreuzblütengewächse, die selbst Methylbromid erzeugen, jedoch ist ihr Anteil mit 15 Prozent am Gesamtausstoß bescheiden. Ferner gibt es immer noch Haushaltsgeräte, die vor 1987 produziert wurden und ihr FCKW dann freisetzen, wenn sie auf der Müllhalde landen. Außerdem ist zu beachten, daß die Dicke der Ozonschicht mit verschiedenen Faktoren variiert. Während Polarnächten z.B., wird aufgrund niedriger Temperaturen und Finsternis Ozon erhöht abgebaut. Als im September 2006 die Temperatur am Südpol $5^{\circ}C$ unter dem üblichen Durchschnittswert lag, wuchs das Ozonloch auf fast vier Mio. Quadratkilometer. [LeM-08]

Die Dichte der Ozonschicht zum 1. Dezember 2008

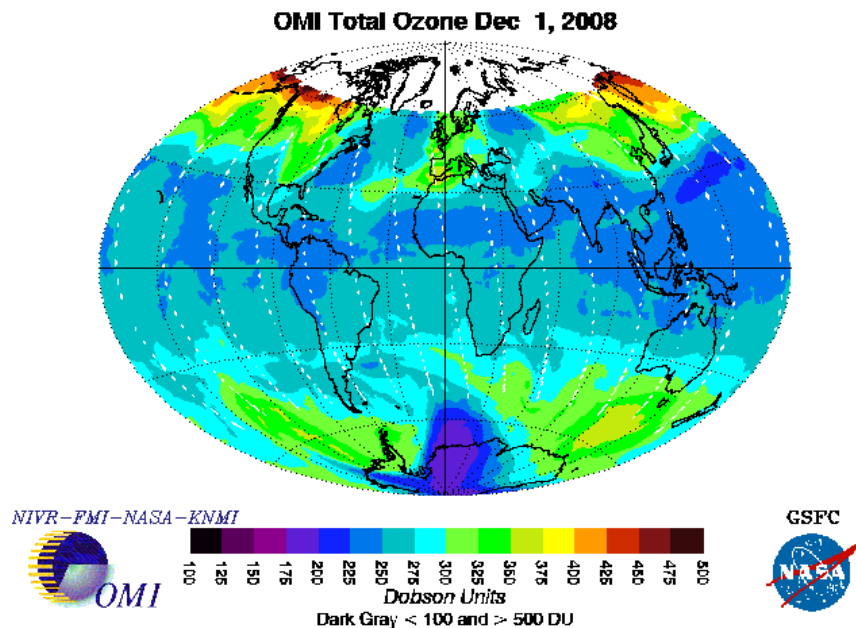


Abb. 4

Die Abbildung über die Verteilung der Ozonmächtigkeit zeigt um den Äquator bis zu den Subtropen eine etwas niedrigere Konzentration als etwa in den Mittleren Breiten. Für die Arktis liegen keine Werte vor. Gemessen wird in der, nach dem Erfinder des ersten Meßgerätes für Ozon in der Erdatmosphäre, Gordon Dobson, benannten, Dobson-Einheit. Dabei entspricht eine Dobson Unit (DU) $2,69 \times 10^{16}$ O₃-Moleküle pro Quadratzentimeter. Eine Dobson-Einheit entspricht einer 0,001cm dicken Ozonschicht unter Normalbedingungen. [URL-07] 300DU entsprechen daher, bei 0°C, nur 0,3cm!

Wiewohl es sich bei den Fluorchlorkohlenwasserstoffen um Treibhausgase handelt und sie daher ihren Beitrag zur Verstärkung des Treibhauses Erde leisten, bewirkt eine Verringerung der Ozonschicht keine Erwärmung auf der Erde. Es wäre schön, wenn die Entscheidung von Montreal Schule für andere Treibhausgase machen könnte. Leider waren sich die Vertreter der folgenden Klimagipfel uneinig.

1.2.4 Schwefelhexafluorid

Ein Kilogramm des Gases Schwefelhexafluorid ist, auf einen Zeitraum von 100 Jahren betrachtet, genauso schädlich wie 22.800kg Kohlendioxid (CO_2). [FOR-07] Trotzdem spielt dieses stärkste Treibhausgas wegen seiner sehr geringen Konzentration in der Atmosphäre eine untergeordnete Rolle bei der globalen Erwärmung. Verwendung findet dieses Treibhausgas heute noch in Koaxialkabeln sowie in der Hochspannungstechnik. Aus Gründen der Umweltschädlichkeit ist es als Isoliergas für Glasscheiben, Füllgas für Sohlen von Sportschuhen und Befüllung von Autoreifen in der EU mittlerweile verboten. [URL-25]

1.2.5 Ozon

O_3 ist für den Menschen nicht nur in der Stratosphäre von Bedeutung. Bei warmem Wetter und strahlendem Sonnenschein erhöht sich, gefördert durch Windstille, die Konzentration über der Erdoberfläche, wenn die UV-Strahlen auf Abgase wie Distickstoffmonoxid treffen. Dies bewirkt eine Spaltung des N_2O , worauf das einzelne Sauerstoffatom sich mit O_2 zu Ozon bindet, was in besiedelten Gebieten eine Gesundheitsgefährdung durch Reizung der Atemwege darstellt. Dabei müssen Städte nicht gefährdeter sein als der ländliche Raum, da NO der Ozonbildung entgegenwirkt. [URL-07] O_3 wird übrigens auch durch Faxgeräte oder Laserdrucker, wenn auch in geringem Maße, freigesetzt.

1.2.6 Sonstige Treibhausgase

Distickstoffmonoxid wird vom Menschen im Zuge intensiver Landwirtschaft und in der Industrie freigesetzt. H_2O baut sich schnell ab, weshalb von ihm keine große Gefahr ausgeht.

2. Gefahren der globalen Erwärmung

Die künftigen Auswirkungen auf die Lebensqualität der Menschheit sind drastisch, zahlreich und nahezu ausschließlich negativ. Das Gesundheitswesen wird mehr Geld benötigen, genauso wie die Landwirtschaft und das Versicherungswesen. Höhere Prämien könnten den Bürger überlegen lassen, ob sich ein Auto für ihn noch rentiert, zumal der Spritpreis aufgrund des Oil Peaks, der gerade überschritten wird, langfristig im Steigen begriffen ist. Mit Oil Peak ist das Fördermaximum an Erdöl durch den Menschen gemeint, dessen genauer Zeitpunkt deshalb nicht berechnet werden kann, da noch nicht alle Quellen erschlossen sind und nicht alle Staaten wahre Aussagen über ihre noch bestehenden Reserven machen. Als gesichert gilt aber, daß die Erdölförderung zunehmend tiefere Bohrungen verlangt, ebenso wie das Erschließen unwirtlicher Naturgebiete, z.B. Alaska, weshalb die Kosten steigen werden. Für das geruchlose Erdgas gilt das gleiche Prinzip. Schätzungen, über die durch die globale Erwärmung entstehenden Gesamtkosten, variieren, liegen aber stets in hohen Zahlen. Z.B. prognostiziert das Deutsche Institut für Wirtschaftsforschung, daß ein Temperaturanstieg von über 4°C alleine der Volkswirtschaft Deutschland bis zum Jahr 2100 drei Billionen Euro kosten würde. [ANS-07] Vielfach ist zu hören, daß jene Kosten, welche heute zum Klimaschutz investiert werden könnten, deutlich unter den Folgekosten des Klimawandels, wie Schäden durch Naturkatastrophen liegen, die entstehen, wenn nichts getan wird.

Eine versteckte Gefahr lauert in den, bereits erwähnten, derzeit auftauenden Permafrostböden. Weniger, weil immer öfter auf ihnen, noch nicht auf Pfählen errichtete Häuser versinken, sondern weil sie einen Pool an Methan besitzen, welches im Zuge des Auftauens freigesetzt wird.

2.1 Auswirkungen und Gefahren nach Bereichen

Die globale Erwärmung wirkt sich auf allen möglichen Gebieten aus, die im folgenden jeweils näher betrachtet werden.

2.1.1 Wetter

Es ist mit stärkeren und schnelleren Schwankungen zu rechnen. Hitzewellen treten künftig häufiger und länger auf. Hohe Luftdruckunterschiede resultieren in zahlreicheren Stürmen. Die durch die Erwärmung erhöhte Verdunstung verursacht variablere und schwerere Niederschläge. Tatsächlich werden manche Gebiete mehr Schneefall erfahren, wobei die hohe Volatilität der Temperaturen zu einer intensivierten Lawinengefahr führt. Umgekehrt treten an anderen Orten der Welt Trockenperioden öfter auf und verursachen Dürren. Auf diese Naturkatastrophe wird in dieser Arbeit noch genauer eingegangen.

Bei Überschwemmungen kann zwischen jenen, die durch wochenlange Niederschläge auf großen Flächen entstehen, und denjenigen, welche Ergebnis eines Wolkenbruchs sind, unterschieden werden. Niederschläge sind aber nicht zwingend erforderlich. Ein durch Hangrutsche verlegtes Erdreich oder eine Verklausung eines Flusses können diesen, als Damm wirkend, über die Ufer treten lassen. Auch ein steigender Grundwasserspiegel kann maßgeblich zu einer Überflutung beitragen. Schäden der Landwirtschaft hängen weniger von der Tiefe des Hochwassers, sondern mehr von der Dauer, in der Pflanzen unter Wasser sind, ab.

2.1.2 Klima

Neben der Eis- und Schneeschmelze auf dem Festland (darunter Grönland und die Antarktis) bewirkt die globale Erwärmung auch eine Verringerung der Dichte und somit eine Ausdehnung des Ozeanwassers. Dies verursacht 50 Prozent des Anstiegs des Meeresspiegels und Überschwemmungen, die nicht nur flache Inseln wie die Malediven oder Kiribati bedrohen werden, sondern auch Küstenstädten ein erhebliches Überflutungsrisiko bescheren wird. Man denke nur an Megastädte wie Rio de Janeiro oder Jakarta. Dabei muß beachtet werden, daß eine Erhöhung des Meeresspiegels regional unterschiedlich ausfällt, da Faktoren wie z.B. Meeresströmungen eine Rolle spielen. Gletscher sind übrigens aussagekräftige Indikatoren für Temperaturänderungen, da sie als träge Gebilde nicht auf Wetterlagen, wohl aber auf lang-

fristige Veränderungen des Klimas reagieren. Schmelzende Eisberge bzw. das schmelzende Eises der Arktis führen nicht zu einer Erhöhung des Meeresspiegels, da sie beim Schwimmen Wasser gleicher Masse verdrängen. Anders ausgedrückt entspricht das durch Abschmelzen entstandene Wasser dem verdrängten.

2.1.3 Ökosystem

Korallen können aufgrund der Erwärmung des Ozeanwassers ihre schützende Kalkschicht nicht mehr bilden, worauf aber Kleinstlebewesen angewiesen sind. Sterben diese, ist die ozeanische Nahrungskette gestört und die Fischerei muß mit Einbußen rechnen. Weiters bewirkt das erwärmte Ozeanwasser die sogenannte Korallenbleiche, die bei anhaltender Belastung zum Tod der Korallen führt. 20 Prozent aller Korallenriffe sind, auch aufgrund des anthropogenen Fischfangs mit Schleppnetzen, bereits tot, 24 Prozent stehen vor dem Kollaps und 26 Prozent sind gefährdet. [URL-07]

Die globale Erwärmung wird auch zum Aussterben von Tier- und Pflanzenarten führen. Dieser Rückgang an Biodiversität liegt darin begründet, daß viele Lebewesen nicht in der Lage sind sich rasch genug, z.B. durch ihr Wanderverhalten, an lebensnotwendige bestimmte klimatische Parameter anzupassen. Oder der Mensch legt mit seiner erbauten Infrastruktur Hindernisse in die Natur, sodaß z.B. der große Teichmolch in Großbritannien nicht nordwärts wandern kann, da die Autobahn M4 ein unüberwindliches Hindernis für ihn ist.

Zwar gibt das Ozeanwasser den aus der Atmosphäre imitierten Kohlenstoff fast zur Gänze wieder an sie zurück, doch ein kleiner Teil wird dem riesigen Pool an Kohlenstoffspeicher hinzugefügt. Seit 1800 haben die Ozeane zwischen 27 und 34 Prozent der anthropogenen CO₂-Emissionen aufgenommen. [URL-07] Die CO₂-Moleküle verbinden sich teilweise mit H₂O-Molekülen, was zur Bildung von Kohlensäure und in Folge der zunehmenden Immission von Kohlendioxid ins Ozeanwasser zur Verringerung des pH-Werts, also einer Versauerung führt.

Wärmeliebendes Ungeziefer wie der Borkenkäfer oder Krankheitserreger für Malaria verbreiten sich leichter und gefährden schließlich Waldbestände und die Gesundheit des Menschen.

2.1.4 Wirtschaft

Ernteausfälle durch Dürren, Erosion oder Überschwemmung, Kosten für Schutzbauten gegenüber Naturkatastrophen und von diesen verursachte Schäden werden die Budgets aller Staaten künftig belasten. Die Versicherungsbranche wird gebietsweise ihre Prämien stark erhöhen. Die Finance Initiative des United Nations Environment Programme (UNEP) gab im November 2006 an, daß sich die Versicherungsschäden gegenwärtig alle zwölf Jahre verdoppeln. Versicherungsgeber könnten sich künftig weigern, Verträge in gefährdeten Gebieten abzuschließen.

Die globale Erwärmung bringt auch eine Verschiebung günstiger Anbaubedingungen mit sich. Während sich in den gemäßigten Breiten mehr Anbaumöglichkeiten ergeben, also mehr Flächen bewirtschaftbar sein werden und mehr Pflanzenarten gedeihen können, ist in der (sub)tropischen Zone mit Einbußen zu rechnen. In Nordeuropa könnten die Ernteerträge künftig um zwei Drittel steigen. [ANS-07]

2.2 Beispiele aus der Realität

2.2.1 Kiribati

Im Pazifik, sieben Flugstunden vom australischen Festland entfernt, erstrecken sich die 33 Atolle des Inselstaates Kiribati über eine Distanz in der Größe der USA. Ihre schmale Form und v.a. ihre niedrige Höhe (maximal drei Meter) macht sie extrem anfällig für Überschwemmungen und den steigenden Meeresspiegel. Ähnlich anderen Pazifikinseln wie jene von Tuvalu, tragen sie mit ihrem geringen Lebensstandard kaum zur Emission an Treibhausgasen bei, müssen aber als erste zur Gänze deren Folgen tragen. Selbst bei einem sofortigen Stop von Treibhausgas-Emissionen käme für diese Staaten die Rettung zu spät. Der Pegel steigt stetig und droht die Atolle zu verschlucken. Gemäß dem vierten Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Bericht wird sich der Meeresspiegel bis 2100 um 69cm erhöhen, andere Quellen sprechen sogar von bis zu 200cm. Die Bewohner werden zu Klimaflüchtlingen, müssen umgesiedelt werden. Doch Ayslplätze für die 93.000 Einwohner sind rar. Am ehesten gelingt es Gebildeten mit Weitsicht auszuwandern, denn nicht alle wollen glauben, daß sie ihre Heimat bald für immer verlieren könnten.

2.2.2 Fairbanks

Fairbanks ist heute die zweitgrößte Stadt Alaskas. Gegründet wurde sie erst 1902 von Goldgräbern aus Klondike. Heute leben die (Ur)einwohner hauptsächlich vom Erdöl. Doch bereitet weniger die Tatsache, das dieses Fördergut endlich ist den Menschen Probleme, sondern der schmelzende Permafrostboden, auf dem die Stadt erbaut wurde. Durch die globale Erwärmung beginnt er zu tauen, wodurch Schäden ökologischer wie wirtschaftlicher Art mit steigendem Ausmaß entstehen. In den Wäldern sackt der Boden ab, wodurch Krater entstehen und sich die Bäume biegen, was einen betrunkenen Wald zur Folge hat. Ganze Landschaften verwandeln sich in Sümpfe, da der Boden wassergesättigt ist. Küsten wandern ins Landinnere, da Ufer nach und nach abbrechen weil der Permafrost keinen Halt mehr gibt. Die Bewohner müssen wiederholt umziehen, da sich ihre Häuser neigen und im Boden zu versinken drohen. Straßen bekommen Wellen oder reißen auf, sodaß die Verkehrssicherheit massiv beeinträchtigt wird und hohe Reparaturkosten anfallen.

2.3 Gefahr am Beispiel der Dürre

2.3.1 Eigenschaften und anthropogener Einfluß

Unter Dürre versteht man eine ungewöhnlich lange Periode, zu der eine bestimmte Region unter permanentem Mangel an Wasserzufuhr leidet. Meist geht damit eine gegenüber dem langjährigen Durchschnitt reduzierte Niederschlagsmenge einher. Dies ist dann der Fall, wenn die Luft eine geringe Feuchtigkeit aufweist, z.B. durch kontinentale Winde bedingt. Die Dürre kann einen beträchtlichen Einfluß auf Ökosysteme und die Landwirtschaft haben, z.B. Versalzung des Bodens, Absterben von Pflanzen der Krautschicht, langfristig auch der Strauch- und Baumschicht. Natürlich wird ein agrarisch bewirtschafteter Boden mittels Süßwasser aus z.B. Flüssen bewässert. Dennoch kann der Boden versauern, da die Salinität gerade bei trockenem, warmem Klima in den Gewässern steigt. Bereits eine kurze Periode an Wasserknappheit kann die Wirtschaft beschädigen. Die United Nations Organization (UNO) schätzt daß jährlich eine Fläche so groß wie die Ukraine durch Dürre, Abholzung und Instabilität des Klimas verloren geht. [URL-27] Im letzten Jahrhundert stieg der globale Wasserverbrauch

mehr als doppelt so hoch, wie die Zunahme der Weltbevölkerung. [URL-29] Die Zahl der von Wasserknappheit Betroffenen steigt.

Seit jeher war Dürre der Auslöser für eine massenhafte Migration, v.a. der Bevölkerung Afrikas. Anthropogene Einflüsse wie Überweidung, exzessive Bewässerung und Abholzung bewirken eine Reduzierung der Saugspannung, also der Kraft des Bodens Wasser zu halten, was Dürre begünstigt. In ariden Gebieten sind die meisten Holzgewächse sehr langsamwüchsig, weshalb eine Aufforstung lange dauert. Dennoch ist der unkontrollierte Holzeinschlag hoch, da der Baumbestand dort oft die einzige Energiequelle ist. [MEN-90] Ein hoher Tierbesatz bei unterlassener Rotation der beweideten Flächen und stark eingeschränkte Weidewanderungen der Tierhalter tragen zur Belastung von Gräsern und Boden bei. Gründe hierfür sind Traditionen oder schlichte Unwissenheit. Der Eingriff des Menschen in von Dürre gefährdete Gebiete, der diese dort oft auslöst, ist in warm-ariden Gebieten aufgrund höherer Siedlungsdichte wesentlich häufiger als in kalt-ariden. Eine Dürre kann schließlich in polaren Regionen wie z.B. Alaska ebenso wie im subtropischen Sahel Afrikas auftreten.

Die Dürrekatastrophe ist die einzige nur langsam entstehende Naturkatastrophe. Ursachen und Folgen sind weit vielfältiger als bei abrupten Naturereignissen wie z.B. Erdbeben und daher schwieriger zu bestimmen, was manchmal nur indirekt gelingt. [GTZ-01] Die Folgen für den Menschen hängen stark von der Bevölkerungsdichte des betroffenen Gebiets sowie vom Migrationsverhalten ab.

Arides Klima darf nicht mit Dürre verwechselt werden. Im Deutschen spricht man dann von aridem Klima, wenn eine Region, basierend auf jahrzehntelangen Daten, über zu wenig Wasser verfügt. Degradation des Landes ist eine Folge des ariden Klimas. Dürre meint hingegen einen unerwarteten Wassermangel.

2.3.2 Erdboden

Da diese Diplomarbeit für den Abschluß der Studienrichtung Geographie geschrieben wird, ist der Fokus auf die Auswirkungen einer Dürre auf den Bereich des Erdbodens gerichtet.

Dieser ist ein an der Erdoberfläche, zwischen Atmosphäre und Grundgestein vorhandenes, an die 200cm dickes, aus Erdreich bestehendes Material, das als natürliches Medium dem Pflanzenwachstum dient. Wasser und Nährstoffe nimmt die Pflanze über ihre Wurzeln aus dem Boden auf. Dieser ist das Produkt hunderter Jahre physikalischer und chemischer Verwitterung von Gestein sowie abgestorbenen Lebewesen. Ein Erdboden besteht nur zu 50 Prozent seines Volumens aus festem bzw. organischem Material sowie Mineralien. Der Rest setzt sich aus Wasser und Gasen in den Poren zusammen. Daß das Wasser eine wichtige Rolle spielt, zeigt Abbildung 5. Die im Boden nach oben zeigenden Pfeile bezeichnen den kapillaren Aufstieg.

Komponenten des Wasserkreislaufs einer Pflanze

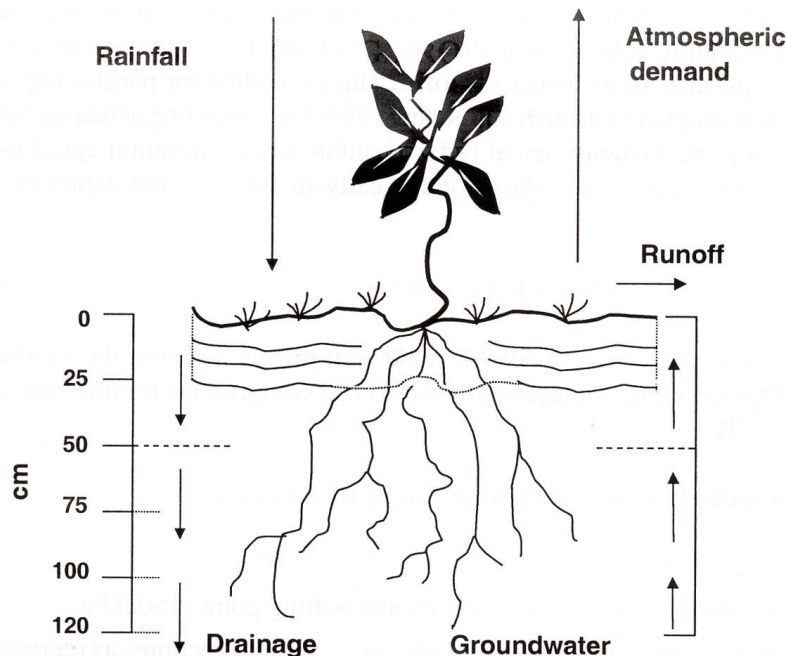


Abb. 5

Man gliedert einen Erdboden nach seinen Korngrößen, der sogenannten Bodentextur, auch Bodenart genannt. Diese bezeichnet gemäß Pedologie die prozentuale Zusammensetzung

nach den Korngrößengruppen Sand, Schluff und Ton und damit die Größe an Hohlräumen. Sand ist in dieser Aufzählung das größte Korn, Ton das kleinste. Die Grenzen zwischen diesen drei ist nach internationalem Standard festgelegt, wobei manche Staaten auch eigene Einteilungen vornehmen. Das Volumen der Hohlräume ist für die Fernerkundung deshalb bedeutsam, da die Bodenfeuchte, gemeint sind die mit Wasser gesättigten Hohlräume, ein gewichtiger Faktor hinsichtlich Absorption/Reflexion ist.

Ein sandiger Boden hält Wasser schlechter als ein toniger und trocknet dementsprechend schneller aus. Je feinkörniger ein Boden, desto höher die Saugspannung. Je höher die Bodenfeuchte, desto mehr Absorption einfallender elektromagnetischer Strahlen, z.B. der Sonne. Ab einer bestimmten Bodentiefe ist stets der Grundwasserspiegel anzutreffen. Wurde aus dem Grundwasser übermäßig viel entnommen, was häufig in Siedlungen, insbesondere Städten, die Regel ist, wird der Boden für Dürre anfällig.

Ein von Dürre betroffener Boden, dessen Vegetation bereits abgestorben ist, wird für äolische Abtragung, der Deflation, anfälliger. Wurde die Erde einer bewirtschafteten Fläche durch Ackern gelockert, trägt dies ungewollt zur Erosion bei.

2.3.3 Arten

Meteorologische Dürre liegt bei einer anhaltenden Periode geringeren Niederschlags als im langjährigen Durchschnitt eines bestimmten Gebiets vor. Sie geht den folgenden Dürrearten gewöhnlich voran.

Bestehen Einbußen in der landwirtschaftlichen Produktion wegen Wassermangels liegt die landwirtschaftliche Dürre vor. Sie ist dann der Fall, wenn die Wurzeln der Pflanzen nicht mehr ausreichend Wasser aus dem Boden aufnehmen können. Die landwirtschaftliche Dürre kann auch bei gleichbleibendem, üblichem Niederschlag entstehen, indem sich die Bodeneigenschaften z.B. durch Erosion verschlechtern, sodaß die Wasserverfügbarkeit für Pflanzen sinkt. Es handelt sich bei ihr um die bekannteste Form der Dürre, da vertrocknete Pflanzen das erste Sinnbild für sie in den Köpfen der Menschen sind. Landwirtschaftliche Dürre passiert heute meist aus einem Mix von klimatischen Veränderungen und anthropogenen Eingriffen, wie erhöhtes Abpumpen von Grundwasser, Einsatz von Herbiziden, Pflanzen von Mono-

kulturen und saurer Regen. Natürlich führt letzterer auch H₂O dem Boden zu und wirkt der Dürre entgegen. Jene Schadstoffe aber, welche hauptsächlich aus Treibhausgasen stammen, die ein saurer Regen mit sich führt, belasten den Boden durch steigende Salinität und machen ihn u.a. für Dürre langfristig anfälliger.

Sinken die Pegel von Seen, Becken und des Grundwassers unter den langjährigen Durchschnitt für wenigstens einige Monate, spricht man von hydrologischer Dürre. Dies geschieht durch eine reduzierte Grundwassererneuerung bei einem niedrigen Grundwasserspeicher. Wie die landwirtschaftliche Dürre kann die hydrologische unabhängig vom Ausbleiben eines Niederschlags ausgelöst werden. Sie folgt häufig den zuvor erwähnten Dürrearten und ihr Auftreten dauert meist länger. Weiters ist sie ein periodisch wiederkehrendes Ereignis, das leichter bei kleinen Aquiferen geschieht, da diese wegen ihres geringen Volumens sensibler auf einen Mangel an Erneuerung reagieren. [VOG-00] In der Regel gehen verringerte Abflüsse und Ernteerträge mit der hydrologischen Dürre einher. Sogar Ökosysteme können sich verschlechtern. Ein anthropogener Eingriff wie Abpumpen des Grundwassers zwecks Wasserbereitstellung für Städte, kann eine hydrologische Dürre nicht nur verstärken, sondern auch auslösen. In Folge wird die Wasserzufuhr anderer Siedlungen behindert und das Getreide am Feld erleidet Streß. Weitere der hydrologischen Dürre förderliche Umstände sind verringerter kapillarer Aufstieg des Bodenwassers bzw. Ausbleiben des Aufstiegs juvenilen Wassers, sowie das Einsinken von Gebäuden oder Straßen.

2.3.4 Messung

Obschon die Dürre eine, seit der Mensch Ackerbau betreibt, bekannte Naturkatastrophe ist, gibt es keine allgemein gültige Meßskala, die ihre Intensität, wie z.B. die Beaufortskala bei Wirbelstürmen, oder die Schadenshöhe, wie z.B. die Mercalliskala bei Erdbeben, ausdrückt. Indirekt versucht man durch Messungen von Wasser auf Dürren zu schließen bzw. sie zu beurteilen. Zahlreiche Kennzahlen und Indizes wurden entwickelt, um den Grad der Trockenheit einer Landschaft zu messen, z.B. Palmer-Index. Einen Überblick bietet [NAR-05]. Der Niederschlag und das Bodenwasser sind hierbei zwei sehr wichtige Faktoren. Auch wenn eine landwirtschaftliche wie eine hydrologische Dürre unabhängig von einer Niederschlagsveränderung auftreten können, ist ein ausbleibender Regen das wohl am leichtesten zu verstehende Indiz einer möglichen Dürre. Des weiteren bestehen langjährige Aufzeichnungen über Regen.

Die Nachteile bei der Messung des Niederschlags liegen darin, daß weder die Bodeneigenschaften, noch die chemischen Eigenschaften der Wassertropfen oder die Evapotranspiration berücksichtigt werden. Ein versiegelter Boden, der das Wasser kaum infiltrieren kann, statt dessen abfließen läßt, nützt den Pflanzen nichts. In diesem Fall läge eine landwirtschaftliche, nicht aber eine hydrologische Dürre vor. Ist die Verdunstungsrate hoch, gelangt ebenfalls weit weniger Wasser in den Erdboden, als vom Himmel gefallen ist. Die Berechnung des effektiven Niederschlags berücksichtigt zwar die Evapotranspiration. Diese ist aber selbst nur schwer meßbar. [VOG-00] Die Bodenfeuchte wird in Kapitel 3.4.7 behandelt.

Für eine hydrologische Dürre müssen die Pegel von flächenhaften Gewässern einerseits gemessen, andererseits ein Grenzwert, ab dem eine Dürre vorliegt, festgelegt werden. Besteht bei Pegeln unter dem definierten Wert wechselhaftes Wetter mit kurzen Regenschauern, könnten, statistisch gesehen, viele kleine aufeinanderfolgende Dürren das Ergebnis sein, vergleiche die „Minor droughts“ in Abbildung 6. Dies ist natürlich nicht der Fall, sondern eine zusammenhängende Dürre, die nur beizeiten durch etwas Niederschlag abgeschwächt wird. Diese Schwäche, sie zeigt sich häufig bei Fließgewässern, kann nur bedingt durch einen variablen, v.a. aktuelle Pegel stark einbeziehenden, Grenzwert entschärft werden.

Eine Dürre knapp unter dem Schwellenwert

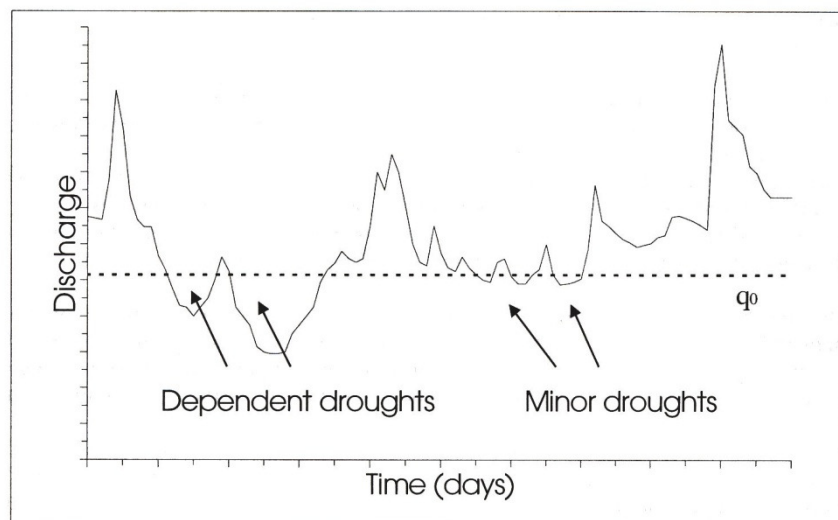


Abb. 6

Eine weitere Möglichkeit die hydrologische Dürre zu messen, besteht darin, die Menge an sich erneuerndem Wasser im Boden zu messen. Ist sie geringer als der langjährige Durchschnitt, liegt eine solche Dürre vor. Da die Speicher des Grundwassers jedoch unberücksichtigt bleiben, ist diese Meßvariante recht ungenau.

Die Festlegung eines arithmetischen Mittels als Grenzwert bei der hydrologischen Dürre hat einen großen Einfluß auf die Tatsache, ob eine solche vorliegt oder nicht. Ein niedriger gibt sehr wenige Dürren dieser Art aus, ein um nur wenige Meter höherer womöglich schon dreimal so viele Dürren. Diese Zahlenspielerei sollte die wahren Folgen, die selbstverständlich lokal variieren, nicht kaschieren. Ein Gebiet A, das z.B. 2008 mehr Niederschlag erhielt als das völlig idente Gebiet B, kann trotzdem einen größeren Dürreschaden davongetragen haben. Nämlich indem der Niederschlag in einer knappen Periode fiel, die längste Zeit des Jahres aber ausblieb. Durchschnittszahlen sind also stets mit Vorsicht zu genießen. Beim Feststellen der Intensität einer Dürre muß man immer die Gesellschaft und Wirtschaft des betroffenen Gebiets berücksichtigen.

2.3.5 Folgen

- Geringer Ertrag in der Landwirtschaft bei schlechter Qualität der Ernte
- steigende Agrarpreise
- Versalzung des Bodens (neben der hohen Verdunstung durch den kapillaren Aufstieg des Wassers im Erdboden bedingt)
- verminderte Qualität des verbliebenen Trinkwassers
- Fehlernährung, Dehydratation und daraus resultierende Krankheiten
- Hungersnöte
- Staubstürme
- Sandstürme, wenn ein bereits von Desertifikation gezeichnetes Gebiet betroffen ist
- Brände
- innere Unruhen
- Massenmigration und internationale Flüchtlinge
- Kriege über natürliche Ressourcen wie Wasser und Lebensmittel
- verringerte Stromerzeugung bei Wasserkraftwerken als auch bei jenen, die Kühlwasser erfordern

- Wasserkürzungen in der Industrie
- Beeinträchtigung der Habitate von wild lebenden Tieren am Land wie im Wasser

Die Auswirkungen einer Dürre auf Völker hängen immer stark von der Vulnerabilität ihrer Region, sowie von effektiven Gegenmaßnahmen wie künstliche Bewässerung oder Fruchtwechselwirtschaft ab. Das Fehlen adäquater Linderungsstrategien fordert große menschliche Opfer, v.a. in dicht besiedelten Gebieten. Periodisch wiederkehrende Dürren auf der Somali-Halbinsel lösten eine ökologische Katastrophe mit massiven Kürzungen an Lebensmitteln aus, vergleiche Abbildung 7. Überdurchschnittliche Trockenperioden heizen bestehende Konflikte durch Migration wie jenen im sudanischen Darfur an. Dort müssen die Nomaden des Nordens aufgrund von Desertifikation in den von Seßhaften bewohnten Süden ziehen, was Streit um fruchtbare Fläche nach sich zieht. Nicht besser sieht es in den Einzugsgebieten von Euphrat und Tigris aus. Der Iran, Irak und Syrien beanspruchen jeweils mehr, als den anderen beiden recht ist. Schon 1974 ließ der Irak Truppen an der Grenze zu Syrien postieren und drohte den al-Thawra-Staudamm am Euphrat zu zerstören. Sehr kritisch ist die Situation im Einzugsgebiet von den Himalayaflüssen (u.a. Ganges, Brahmaputra, Jangtse), wo 2,4 Mrd. Menschen von Überschwemmungen und Dürren zugleich bedroht sind. Gerade der Ganges ist mit seinem Trinkwasser, das in der Landwirtschaft auch der Bewässerung dient, ein Lebensspender. In Amazonien droht der Regenwald aus der Kombination von Abholzung und Dürre sich in eine Savanne oder gar Wüste zu verwandeln. [URL-28] Gerade die grüne Lunge Brasiliens ist sehr verletzlich. Denn bei einer Abholzung von 40 Prozent ist der Wendepunkt erreicht, ab dem der Prozeß der Savannen-Bildung unumkehrbar wird. [URL-31] Im Übrigen erreicht die Rohdung zusammen mit Bränden 75 Prozent der Treibhausgas-Emissionen Brasiliens, eines der Länder, die am meisten zur anthropogenen globalen Erwärmung beitragen.

Nicht nur für Menschen kann Dürre tödlich enden



Abb. 7

Verschmutztes Wasser und das Fehlen hygienischen Trinkwassers sind eine der größten Todesursachen weltweit, für Kinder unter fünf Jahren die größte. [URL-07] Dramatisiert wird die Situation in Gebieten mit Wassermangel, wenn eine Dürre hereinbricht. Vielerorts führte der unbedachte Umgang mit Wasser zu einem Rückgang an Feuchtgebieten, sowie zu einer erhöhten Vulnerabilität während Trockenperioden. Heute übersteigt die Zahl an Personen ohne Zugang zu sauberem Trinkwasser die Milliardengrenze. Einbußen in der Landwirtschaft geschehen dadurch, daß einerseits angebaute Pflanzen quasi verdursten, andererseits von trockenresistenteren verdrängt werden.

2.3.6 Maßnahmen zur Linderung

- künstliche Bewässerung
- Entsalzung von Meerwasser zur Bewässerung bzw. für den Konsum
- Monitoring z.B. der Bodenfeuchte gefährdeter Gebiete unter Heranziehung verschiedener Indizes
- nachhaltige Landnutzung mit Fruchtwechselwirtschaft
- Schützen der Ökosysteme (v.a. der Feuchtgebiete und Uferzonen)
- Speichern des Regenwassers
- Recyceln von Abwässern

- Bau von Wasserleitungen in potentielle Dürregebiete
- Restriktionen im Wasserverbrauch, v.a. in an Wasser reichen Regionen
- künstlicher Regen

Der letzte Punkt bedarf einer näheren Erläuterung. Gemeint ist das in China heute weit verbreitet eingesetzte cloud seeding, also das „Besäen“ von Wolken mittels Chemikalien, z.B. Silber-Jodid, einer Form von Geo-Engineering, das der Wetterbeeinflussung dient, wodurch man einen Niederschlag auslösen kann. Die festen Partikel ermöglichen den in der Atmosphäre kondensierten Tröpfchen ein schnelleres Anlagern, wodurch sich rascher Regentropfen bilden, die zur Erde fallen. Der Wunsch des Menschen ins Klimageschehen zu seinen Gunsten einzugreifen ist nicht neu. An einem anthropogen ausgelösten Niederschlag wurde schon vor Jahrzehnten in der NOAA und im Bureau of Reclamation in den USA und in der Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO) in Australien geforscht. In Nordchina konnten dadurch Dürren vermindert werden, aber auch der Großraum Peking, der von Zeit zu Zeit mit Wasserknappheit kämpft, profitierte gemäß den chinesischen Behörden davon. Allein 2003 wurden über 1800 Bezirken in China mittels Flugzeugen Chemikalien in die Atmosphäre zwecks Auslösung von Niederschlag abgefeuert. [URL-33] Ob so ein Vorgehen moralisch vertretbar ist, bleibt streitbar. Das Argument der Befürworter, die globale Erwärmung stoppen zu können, greift nicht mehr, wenn man bedenkt, daß die Technologie genauso zwecks wirtschaftlichen Nutzens oder nach Belieben, wie zur Eröffnung der Olympischen Sommerspiele in Peking 2008, eingesetzt wird. Welche langfristigen Auswirkungen ein anthropogener Eingriff wie cloud seeding auf das erdnahe Klima hat, ist nicht bekannt.

Neben dem Auslösen von Niederschlag gibt es weitere Ideen der Wettermodifikation mittels Geo-Engineering. Z.B. das Pumpen von Sulphur in die Atmosphäre, um den kühlenden Effekt eines Vulkanausbruchs zu mimen – als Ausgleich für die globale Erwärmung. Die bei einer Eruption freigesetzten Sulfatpartikel bewirken eine erhöhte Reflexion der Sonnenstrahlen in der Atmosphäre und folglich eine verringerte Temperatur an der Erdoberfläche. Forscher sprechen hingegen von dadurch ausgelösten Problemen, z.B. potentiellen katastrophalen Dürren. [URL-34] Heute werden mehr als hundert Millionen Tonnen Schwefeldioxid jährlich vom Menschen in die Atmosphäre gesetzt. [MOR-07]

Der sorgfältige Umgang mit sauberem Wasser wird angesichts des steigenden Wasserbedarfs der wachsenden Erdbevölkerung, vergleiche dazu Abbildung 8, zukünftig noch bedeutsamer. Dabei muß bedacht werden, daß ein erhöhter Wasserverbrauch auch durch die heutige Art der Bewirtschaftung von Land, der in der Industrie verwendeten Techniken und z.B. Tourismus bedingt ist. Objekte hohen Wasserverbrauchs funktionieren meist nur mit Süßwasser, wie etwa Atomkraftwerke. Exotische Reiseziele erfreuen sich immer größerer Beliebtheit. Einige Länder, wie Thailand, leben vom Tourismus, der Vorrang gegenüber der Natur hat.

Geschätzter globaler Wasserverbrauch im 20. Jahrhundert

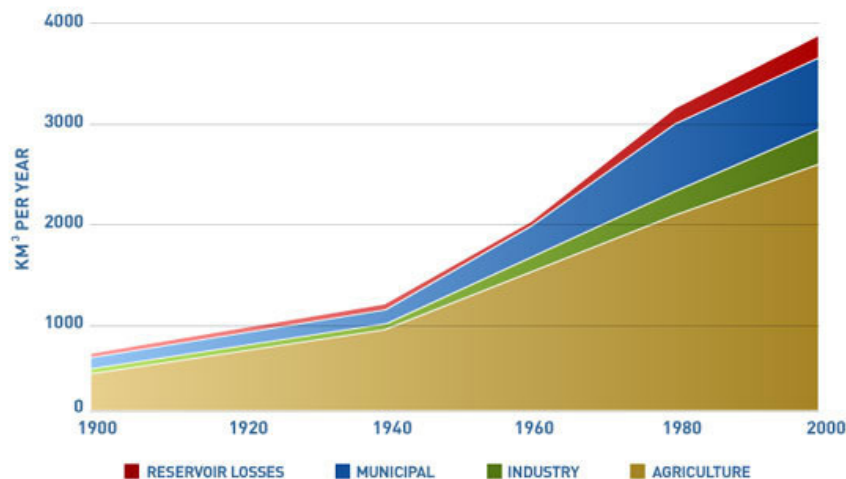


Abb. 8

2.3.7 Degradation

Dies meint die grundlegende Veränderung von Bodeneigenschaften, wodurch sich Bodentyp und –art ändern können. Ein degradierender Boden muß sich nicht zum schlechten wandeln, verliert aber häufig vielfältige Funktionen wie etwa Filterung des infiltrierenden Wassers oder Beherbergung einer großen Artenvielfalt. Rund 164 Mrd. Hektar sind weltweit von leichter bis schwerster Degradation betroffen, das ist mehr als die Hälfte aller nutzbaren Ackerflächen. [LeM-08] Daß alle Kontinente betroffen sind, zeigt die Abbildung 9. Es sind vier Arten an Degradation unterscheidbar. Die erste entsteht durch Wassererosion. Dabei werden Bodenpartikel und Nährstoffe ausgeschwemmt. Wind trägt den Boden flächenhaft ab, wie z.B. in den Great Plains der USA oder in der Sahel-Zone Afrikas. Die dritte Form bezeichnet die

Veränderung der chemischen Zusammensetzung eines Bodens. Pflanzen entnehmen dem Boden Nährstoffe wie Stickstoff, Phosphat oder Kalium, um im Gegenzug Säuren an ihn abzugeben. Um der Versauerung entgegenzuwirken muß der Boden gekalkt werden. Industrieabwässer, die in den Boden gelangen, stellen eine Gefahr mit ähnlichen Folgen dar. Als vierte Art der Degradation sei die physikalische, z.B. die Verdichtung des Bodens durch schwere Landmaschinen, genannt. Alle vier Formen können gleichzeitig auftreten und damit verstärkend wirken.

Weltweites Ausmaß und Art der Degradation 1990

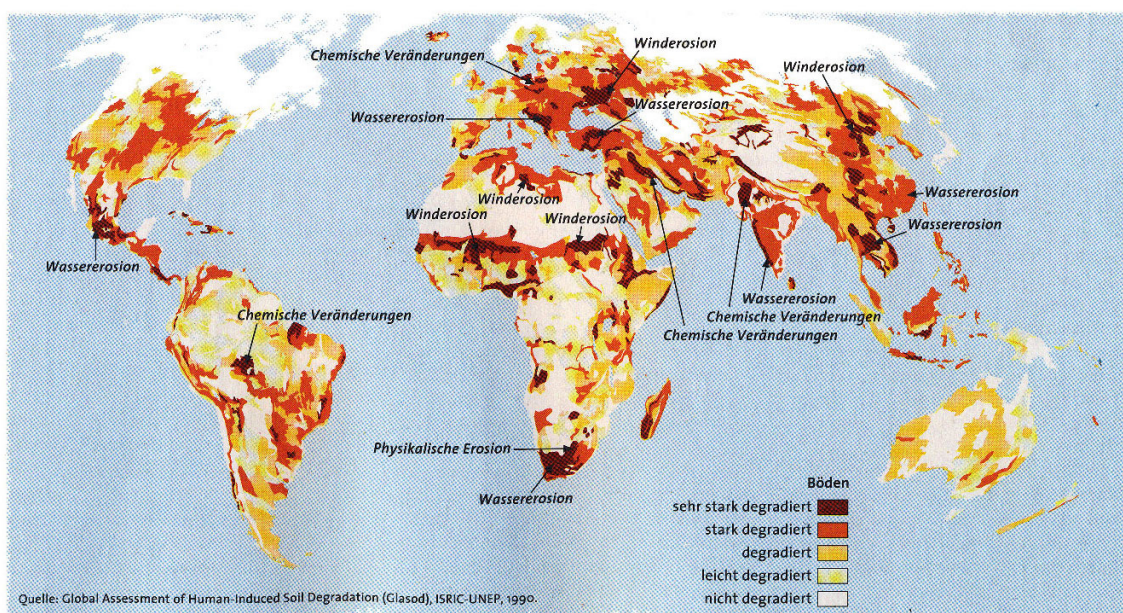


Abb. 9

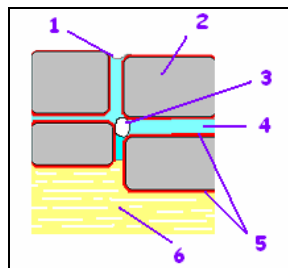
2.3.8 Bodenfeuchte und Bodenwasser

Die Bodenfeuchte meint den Grad an mit Wasser gesättigten Bodenporen. Sie ist neben der Schneedecke ein wichtiger meteorologischer Faktor unter der Erdoberfläche, der das Klima insbesondere in den obersten Bodenschichten beeinflusst, indem auf den fühlbaren und latenten Wärmestrom Einfluß genommen wird. Folglich werden durch die Bodenfeuchte auch Energie- und Wasseraustausch zwischen Atmosphäre und Festland verändert. Das Wasser im Boden eines Einzugsgebiets spielt eine wichtige Rolle, da es die Menge der Infiltration sowie des Interflows von Niederschlagswasser bestimmt. Auch aus sozioökonomischer Sicht ist die

Bodenfeuchte bedeutsam, denn eine geförderte Dürre bzw. Überschwemmung wirkt sich auf die Wirtschaft des Menschen aus.

Im Gegensatz zum perkolierenden Sickerwasser, welches in tiefstmögliche Poren gelangt, meint die Bodenfeuchte genau genommen das Haftwasser. Zusammen bilden sie das Bodenwasser. Das Haftwasser fasst das gegen die Schwerkraft durch die Saugspannung im Boden gehaltene Wasser zusammen, bestehend aus dem durch Adhäsion und Kohäsion gehaltenen Kapillarwasser und dem an der Oberfläche von Bodenpartikeln gehaltenen Adsorptionswasser, siehe Abbildung 10. Letzteres lagert sich an den Kornoberflächen an, ist bei Böden geringer Korngröße wie etwa Ton höher als bei solchen mit hoher Korngröße. Auch die Kornform und der Aufbau der Körner spielt eine Rolle. So weisen Tonminerale eine große Oberfläche auf.

Bodenwasser



- 1-tragender Meniskus
- 2-Bodenpartikel
- 3-Luft führende Bodenpore
- 4-Kapillarwasser
- 5-Adsorptionswasser
- 6-Grund- oder Stauwasser

Abb. 10

Großmaßstäbige Messungen der Bodenfeuchte dienen einer Reihe von Anwendungen wie Wettervorhersage, Beobachtung des Getreidewachstums und der Dürre, dem Abschätzen von Grundbedingungen für Überschwemmungsprognosen sowie der Berechnung des globalen Wasserbudgets. Für die Hydrologie und die Landwirtschaft ist die Bodenfeuchtigkeit von äußerster Wichtigkeit.

Die Messung der Bodenfeuchte kann in situ, z.B. mittels gravimetrischer Proben bzw. Zeitbereichsreflektometrie, oder aus der Atmosphäre, z.B. mittels Satelliten erfolgen. Eine genaue ist aber immer schwierig, da die Bodenfeuchte stark mit Raum und Zeit variiert. [WAG-08] Beste Meßergebnisse leisten gravimetrische Proben, die aber nicht automatisiert werden können. Eine Bodenprobe wird, vor dem normgemäßen Trocknen in einem Ofen, gewogen. Die Gewichts Differenz zwischen feuchter und trockener Probe gibt Aufschluß über den Feuchtigkeitsgrad. Bei der Zeitbereichsreflektometrie nutzt man die im Boden variierende Dielektrizitätskonstante, also die Durchlässigkeit eines Materials für elektrische Felder. Zumindest zwei parallele Leiter (Stäbe) werden in die Erde eingebracht und Spannung angelegt. Durch die Laufzeit der Impulse läßt sich die volumetrische Feuchte berechnen. [URL-07]

Mittels Fernerkundung erhobene Bodenfeuchte wird oft direkt in hydrologische Modelle aufgenommen, was die Bedeutung dieses Faktors unterstreicht. [WAG-08] In situ kann stets nur punkthaft gemessen werden, im Gegensatz zu luft- oder weltraumbasierter Vorgangsweise, die immer flächenhaft ist. Aus der Umrechnung von Punktmessungen auf die Umgebung bzw. das Einzugsgebiet, um einen flächenhaften Datensatz zu erhalten, sind stets gewisse Ungenauigkeiten unvermeidbar. Denn benachbarte Gebiete, z.B. umliegende Hänge, nehmen Einfluß auf den Wert der Bodenfeuchte, sodaß Böden auf kleiner Fläche markante Unterschiede aufweisen. Und gerade das Gelände ist der Hauptgrund, warum sich in situ Messungen nicht in regelmäßigen räumlichen Abständen über eine große Fläche und damit repräsentativ durchführen lassen. Viele Gebiete sind dem Menschen nur schwer zugänglich (Gebirge, Moore, Regenwald, etc.) und der logistische Aufwand ist beträchtlich. Aus punkthaften Messungen errechnete Flächen sind zudem teuer. Ein Problem dem auch die fernerkundliche Messung nicht entrinnen kann, ist die zeitliche Variabilität. Bodenfeuchte kann in den obersten Zentimetern des Bodens innerhalb von Stunden signifikante Unterschiede aufweisen.

2.3.9 Dürrekrisen

Mitte der 1980er herrschte in mehreren Teilen der Welt eine große Dürre. Besonders war die Sahel-Zone in Afrika betroffen. Dort war es die schwerste Dürre im gesamten 20. Jahrhundert, eine Flucht von Millionen Menschen vor dem Klima auslösend und ein trockeneres Zeitalter einläutend. Denn lagen die Niederschlagsmengen der 1950er noch über dem langjährigen Durchschnitt, verliefen sie von 1968 bis 1997 mit 25 bis 40 Prozent kontinuierlich unter

ihm. [NIC-00] Einfluß auf Dürrekrisen nimmt das El Niño-Phänomen. Dieses wird zunehmend schwerer vorhersagbar, weshalb es keineswegs für jede Dürre im von dieser Veränderung betroffenen Gebiet herangezogen werden kann.

Genau genommen muß man vom Phänomen der El Niño Southern Oscillation (ENSO) sprechen, das sich in die Normalphase, El Niño und La Niña gliedert. Mittels Dendrochronologie konnte nachgewiesen werden, daß diese Oszillationen im Pazifik nahe dem Äquator nicht neu sind und systematisch seit mehr als hundert Jahren wiederkehren. [JEN-07] Alle zwei bis sieben Jahre ruhen die Passate im Zentral- und Westpazifik. Die Zirkulationen von Wasser und Luft werden verändert, was sich in Anomalien von Niederschlag, Temperatur sowie Wind oft verheerend ausdrückt. Wie der Begriff ENSO nahelegt, verlaufen die beeinflussten Strömungen und Zirkulationen im Gebiet südlich des Äquators, in der Normalphase gemäß dem langjährigen Durchschnitt. Vor einem El Niño verschieben sich die Ozeanströmungen und Winde vor der Westküste Südamerikas, wodurch warmes Wasser ostwärts transportiert wird. Dabei wird ein El Niño gewöhnlich von warmen Ozeantemperaturen, speziell im äquatorialen Pazifik, begleitet. In Folge bleibt die Durchmischung der obersten Wasserschicht im östlichen Pazifik mit dem kühleren, nährstoffreichen Tiefenwasser aus. Siehe dazu die Karte der globalen Meerestemperaturen, insbesondere in der Äquatorzone in Abbildung 11. (Die Bezeichnungen unter den Karten beziehen sich stets auf die Küste Südamerikas.) Das Warmwasser unterbricht die Nahrungskette im Meer, denn in Folge der fehlenden Durchmischung des Ozeanwassers stirbt der Plankton und Fischschwärme wandern ab, was die Fischerei beeinträchtigt. Fischer benannten dieses Wetterphänomen El Niño (das Christkind) weil es um die Weihnachtsfeiertage auftritt. Umgekehrt sind die oberflächennahen Meerestemperaturen während La Niña niedrig. Sie tritt meist nach einem El Niño auf.

Globale Meerestemperaturen während El Niño und La Niña vor Südamerika sowie eines normalen Jahres

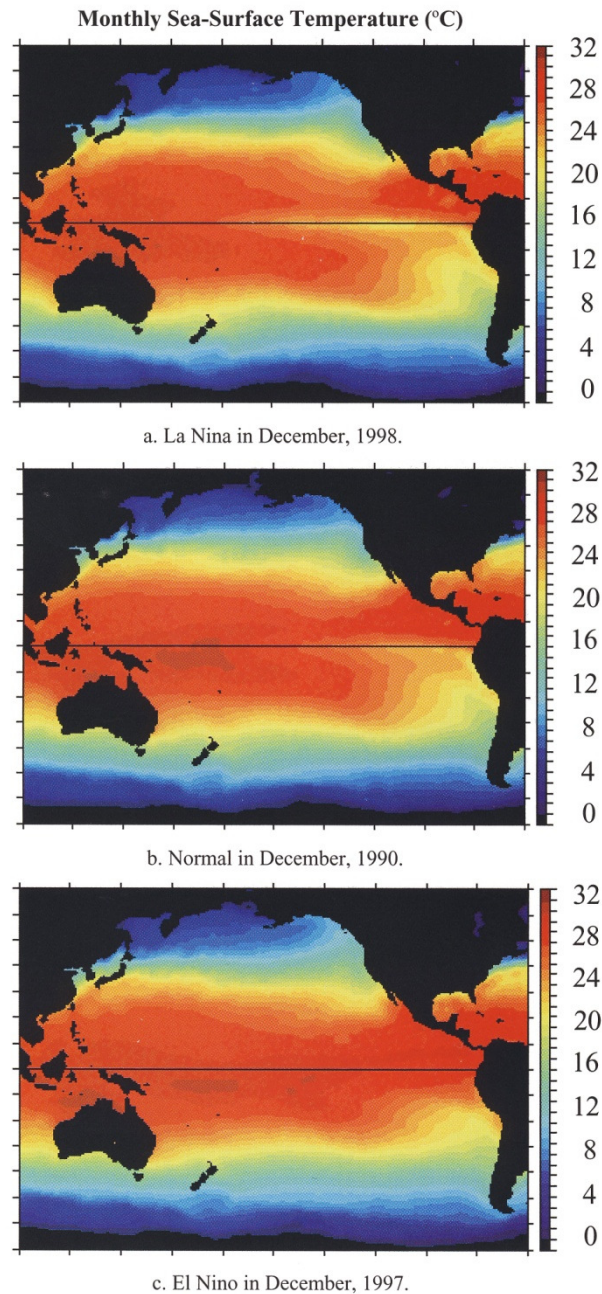


Abb. 11

Die Dürre der 1980er traf nicht zufällig mehrheitlich ärmere Schichten der Weltbevölkerung. Entwicklungsländer sind auf Grund ihrer geographischen Lage in besonderem Maße extremen Naturereignissen ausgesetzt. Des weiteren erhöht der vergleichsweise niedrige Entwicklungsstand, der sich u.a. an fragiler Infrastruktur, defizitären Baustrukturen von Häusern, Anfällig-

keit der produktiven Tätigkeiten, geringem politischen und sozialen Organisationsgrad sowie nicht existenten Warnsystemen ablesen läßt, die Anfälligkeit für Naturkatastrophen. [GTZ-01] Armut fördert auch die Erhöhung der Dürregefahr, wenn z.B. wilde Müllkippen angelegt oder Brandrodungen durchgeführt werden. Ebenso können überholte Produktionsmethoden risikofördernd wirken. Hinzu kommt ein mageres Budget, das die Rettung von Menschen und die Behebung der Zerstörungen verlangsamt.

Der tägliche Kalorienverbrauch

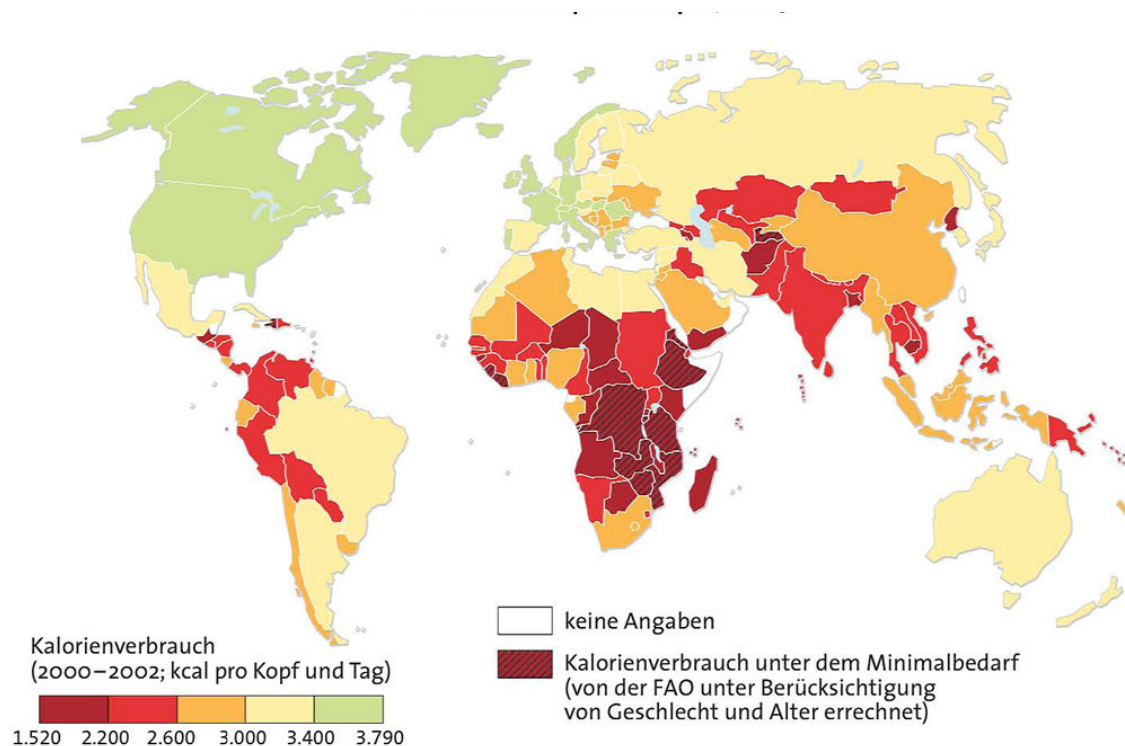


Abb. 12

Dürre ist die häufigste natürliche Ursache für Hungersnöte. Deren Anzahl habe sich gemäß der Food and Agriculture Organization (FAO) um die Jahrtausendwende gegenüber den 1980ern verdoppelt. Besonders hart traf es Afrika, dort ist sogar eine Verdreifachung zu verzeichnen. Wo Wasser vorhanden ist, kann ertragreicher angebaut werden und mehr Nahrung zur Verfügung gestellt werden. Man vergleiche zu diesem Sachverhalt Abbildung 12. Zur Nahrungsmittelknappheit trugen neben anderen Naturgewalten (Frost, Überschwemmungen) auch Schädlingsbefall und v.a. Krieg, Vertreibung und politische Entscheidungen bei: Weltorganisationen wie der Internationale Währungsfonds (IWF) zwingen mit ihren Strukturan-

passungsprogrammen Staaten dazu, Subventionen lebensnotwendiger Güter einzustellen, Erträge der Schuldentilgung zuzuführen und die Wirtschaft zu liberalisieren.

Im Zuge dessen wird von Agrarkonzernen Ländern des Südens der Anbau gentechnisch veränderten Saatguts, nach Bezahlung von Gebühren, so es dem Konzern gelang, das Saatgut zu patentieren, aufgezwungen. Dabei dient das Angebaute wie bei Soja manchmal gar nicht der hiesigen Bevölkerung, sondern als Tierfutter für z.B. Rinder, die damit für Fast Food-Ketten gemästet werden. [WER-08] Der frühere US-Präsident George W. Bush kritisierte öffentlich die EU-Staaten in ihrem Bestreben, Genfood aus den USA nicht importieren zu wollen, dem Welthunger tatenlos zuzusehen. [URL-12] Dabei sind es mehrheitlich amerikanische Konzerne, die die Landwirtschaft armer Staaten für ihre Zwecke beeinflussen. Ferner ist der Hunger eine Frage der Verteilung, die Einführung der Nutzung von Gentechnik für Lebensmittel nicht notwendig. Es muß darauf hingewiesen werden, daß auch der biologische Anbau früher oder später durch natürliche (Pollen, Tierfutter) oder versehentliche Kontamination zu einem geringen Teil gentechnisch manipulierte Bestandteile enthalten wird. Landwirte von Ländern, in denen für Saatgut Lizenzen bezahlt werden müssen, können leicht ungerechtfertigt in Bedrängnis geraten, ihre Zahlung versäumt zu haben, wenn in ihrem Getreide genetische Veränderungen nachgewiesen werden. Denn wenn unweit ihres Feldes Genfood angebaut wird und der Wind den dortigen Samen aufs eigene Feld weht, ist es ein leichtes, den eigenen Grund zu kontaminieren. Dieses einfache Beispiel zeigt verständlich auf, daß es bei einer Ausweitung des Anbaus genetisch veränderter Pflanzen kein Zurück mehr geben könnte.

2.4 Die Gefahren der Klimaveränderung sind vom Menschen beeinflusst

Bei allen klimatischen Gefahren darf nicht vergessen werden, daß der Mensch, und zwar v.a. jener aus den Industriestaaten, seinen Planeten prägend nutzt. Er verbraucht dabei täglich allerdings mehr, als an Ressourcen vorhanden sind. Um dies zu veranschaulichen schuf der Wirtschaftswissenschaftler William Rees den „ökologischen Fußabdruck“. Dieses Maß gibt die Menge an Fläche, Nahrung und Trinkwasser, sauberer Luft, Baumaterial, etc. an, die der durchschnittliche Erdenbürger zum Überleben verwendet. Der Fußabdruck einer Bevölkerung bezeichnet dementsprechend die Fläche an Böden und Gewässern, die nötig ist, um die Ressourcen für ihren Lebensstil bereitzustellen und die anfallenden Abfälle und Rückstände aufzunehmen. [LeM-08] Global gesehen wurde der ökologische Fußabdruck in den 1980ern

erstmals größer als der Planet selber und wuchs. 1999 z.B. betrug er pro Person 1,9 Hektar, jener eines Europäers ca. 5 und der des US-Amerikaners 9,7 Hektar. Anders ausgedrückt verbrauchte ein Europäer 2,75 mal die auf der Erde vorhandenen Ressourcen, ein Amerikaner gar 5,5 mal. Ein Inder hingegen müßte sich mit einer halben Erde zufrieden geben. [WER-08] Legt man den ökologischen Fußabdruck auf die Staatsfläche um, ergibt sich die Karte aus Abbildung 13. 83 Prozent der Erdoberfläche, mehr denn je, werden heute vom Menschen genutzt. Dabei hat sich die Aussterberate von Fauna und Flora stark erhöht.

Die Größe des ökologischen Fußabdrucks 2003 pro Person und Staat als morphologische Karte

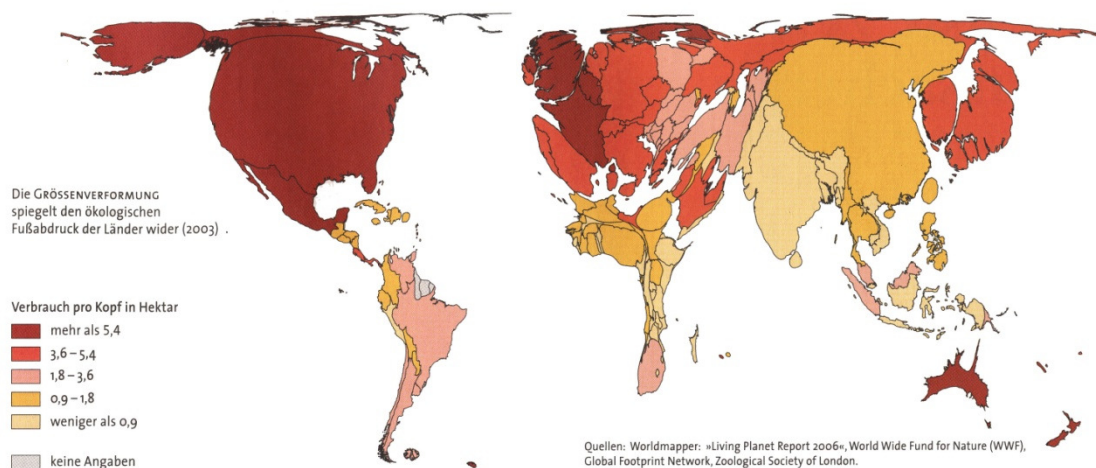


Abb. 13

Der verschwenderische Stil jener Verbraucher an hohen Erdressourcen gibt ein schlechtes Beispiel vor. Schwellenländer wie Indien oder China kritisieren ihnen auferlegte Maßnahmen zum Klimaschutz, da sie sich dadurch in ihrer nachholenden Industrialisierung eingeschränkt sehen. Außerdem wird im Süden der Verdacht gehegt, der Umweltschutz diene als Vorwand um die Privilegien des Nordens zu schützen. [MÜL-07] Es ist nicht einfach einen Konsens zu finden, zumal China v.a. durch seine Kohleverbrennung, zwei Mrd. Tonnen jährlich und damit doppelt so viel wie die USA bei diesem Energieträger emittiert, genauso zu den Klimasündern zählt. Immerhin bestehen Pläne, bei erneuerbaren Energieträgern die größten Kapazitäten der Welt anzubauen.

3. Maßnahmen mittels Fernerkundung

Der Planet Erde ist ständig in Bewegung. Die Erdrotation um die eigene Achse bewirkt Tag und Nacht. Flora und Fauna sind diesen Veränderungen angepaßt. Relevant für sie ist mehr das Wettergeschehen nahe der Erdoberfläche. Das Gefüge aus Wind, Niederschlag und Temperatur verändert auch den Lebensraum des Menschen. Nicht zuletzt ist er es, der ins Klimageschehen eingreift und nachhaltige Veränderungen, leider mehr zum Negativen, bewirkt. So ist es gerade heute sehr wichtig, Veränderungen an der Erdoberfläche zu beobachten. Eine Möglichkeit dazu ist die Fernerkundung.

3.1 Was ist die Fernerkundung?

Damit ist eine Meßmethode über elektromagnetische Strahlen gemeint, bei der die Empfangseinrichtung (Flugzeug, Satellit) räumlich vom Meßobjekt getrennt ist. Da i. d. R. die Oberfläche unseres Planeten untersucht wird, zählen Meßverfahren aus der Astronomie, ebenso wie etwa Wellen des Rundfunks, nicht dazu. Diese Arbeit untersucht u.a. abbildende Fernerkundungssysteme. Das sind solche, deren Ergebnis ein Bild ist. Bei jeder Erfassungsmethode muß das vom Sensor gesammelte Datenmaterial am Boden ausgewertet werden, um ein Luft- oder Satellitenbild zu erhalten. Grundlegende Voraussetzung ist, daß sich alle Objekte der Erdoberfläche über die elektromagnetische Strahlung im Lauf der Zeit verändern, was schon das unbewaffnete Auge bestätigen kann. Elektromagnetische Wellen haben eine unterschiedliche Wellenlänge, was in der Fernerkundung sehr bedeutsam ist.

Zur Interpretation fernerkundlich erfaßter Daten ist fachspezifisches Wissen nötig, da die Palette der Anwendungsdisziplinen groß ist. Für manche, z.B. die Forstwissenschaft, sind Regionalkenntnisse ebenso wichtig.

3.2 Elektromagnetische Strahlung

Die kurzwellige Energie der Sonne gelangt als elektromagnetische Strahlung, die Sonnenstrahlung, durchs All in unsere Atmosphäre. Sie ist eine sich wellenförmig ausbreitende Energie. Demnach gilt

$$v = c/\lambda$$

wobei

v die Frequenz in Hertz

c die Ausbreitungsgeschwindigkeit (Lichtgeschwindigkeit) und

λ die Wellenlänge (angegeben in nm (Nanometer), μm (Mikrometer) oder mm (Millimeter)) ist.

Man teilt das elektromagnetische Spektrum je nach Entstehungsart und Wirkung in verschiedene Bereiche, auch Spektralkanäle oder Bänder genannt, ein, deren bekanntester das sichtbare Licht, 0,4 bis 0,7 μm Wellenlänge, ist, siehe Abbildung 14. Solche, denen die Atmosphäre eine hohe Durchlässigkeit gewährt, nennt man atomosphärische Fenster.

Wellenlängenbereiche des elektromagnetischen Spektrums und Grad ihrer atmosphärischen Durchlässigkeit

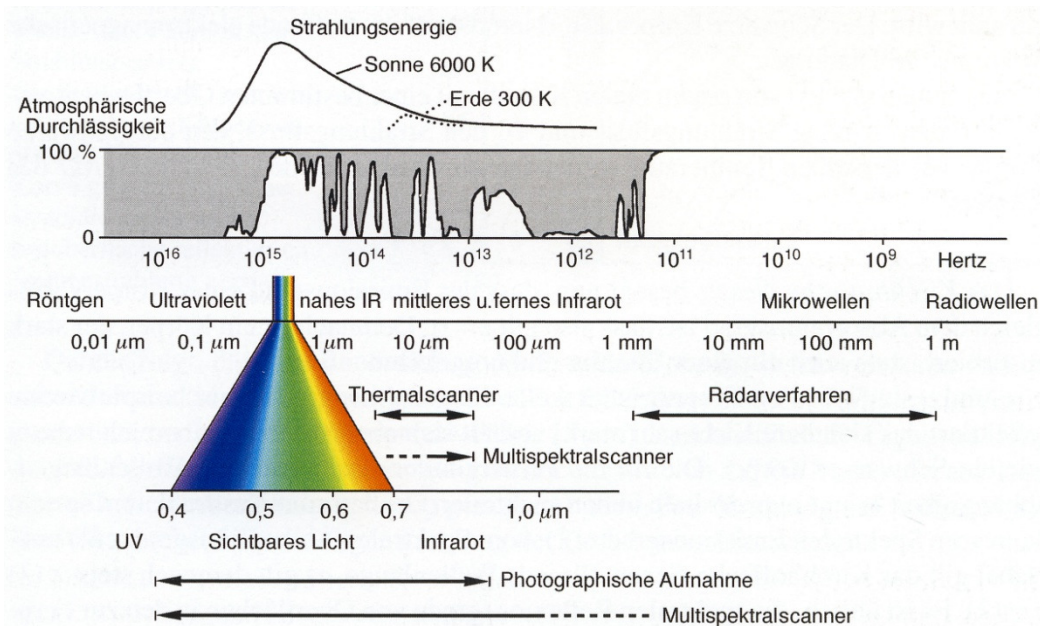


Abb. 14

3.2.1 Veränderung der Strahlen

Jeder Körper nimmt elektromagnetische Strahlung auf und gibt sie wieder ab, wobei gemäß dem Kirchhoffschen Gesetz der Absorptionsgrad α gleich dem Emissionsgrad ϵ ist. [ALB-07] Wird der Körper von elektromagnetischen Wellen getroffen so reflektiert, absorbiert und transmittiert er diese. Bei der Transmission erfahren die elektromagnetischen Wellen eine vom jeweiligen Medium abhängige Ablenkung = Brechung. Beim Übergang von einem Medium zum anderen (z.B. von Luft zu Wasser) ändert sich mit dieser, auch Refraktion genannten, Richtungsänderung die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wellen. Man gliedert die einen Körper treffende Strahlung in

ρ Reflexionsgrad

α Absorptionsgrad

τ Transmissionsgrad

Refraktion findet bereits in der Atmosphäre aufgrund von Dichteänderungen der Luft statt, wobei dies stark von der Wellenlänge abhängt. Die Brechung ist durch die unterschiedlichen

Absorptionseigenschaften der in der Atmosphäre vorkommenden Gase bedingt. Ablenkung erfahren die elektromagnetischen Strahlen v.a. jedoch durch Aerosole, winzige, in der Luft schwebende Fest- und flüssige Körper. Von ihnen reflektieren die Strahlen, je nach ihrer Größe (Dunst, Staub, Wassertropfen), wie bei Kondensationskernen von Wolken, unterschiedlich stark in alle Richtungen. Diese Art der Ablenkung wird Streuung genannt. Sie ist die Ursache, daß es selbst bei geschlossener Wolkendecke unter tags nicht finster wie in der Nacht ist. Umgekehrt wäre das Sonnenlicht bei direkter Strahlung ohne Streuung gleißend hell. Die in der Atmosphäre gestreute Sonnenstrahlung heißt diffuse Himmelsstrahlung oder Himmelslicht. Die trotz Absorption und Streuung verbliebene Strahlung heißt direkte oder gerichtete Sonnenstrahlung und bildet mit dem Himmelslicht die Globalstrahlung. Bei der Absorption werden die elektromagnetischen Strahlen meist in Wärme umgewandelt was bei von der Sonne bestrahlten Objekten leicht ertastbar ist.

Nach der Reflexion am Erdboden durchlaufen die Strahlen in der Luft die gleichen physikalischen Prozesse.

3.2.2 Reflexion am Erdboden

Für die Aufnahme von Fernerkundungsdaten ist es entscheidend, daß sich die Geländeoberfläche und die auf ihr befindlichen Objekte gegenüber der auftreffenden Strahlung sehr unterschiedlich verhalten. [ALB-07] Je nach Material, physikalischem Zustand und Rauigkeit der Erdoberfläche bzw. der Objekte sowie geometrischen Verhältnissen (z.B. Einfallswinkel der Sonnenstrahlung) ergibt sich eine spiegelnde oder diffuse Reflexion. Für erstere gilt das Reflexionsgesetz, gemäß dem einfallender Strahl, Einfallslot und reflektierter Strahl auf einer Ebene liegen, sowie der Einfallswinkel gleich dem Reflexionswinkel ist. Nach der diffusen Reflexion zeigen die Strahlen in alle Richtungen. Am häufigsten kommt in der Natur eine Mischung aus spiegelnder und diffuser Reflexion vor, die Strahlen werden in alle Richtungen unterschiedlich stark zurückgeworfen. Beachtet werden muß stets auch die Position des Sensors, da von ihm, wie beim Stand der Sonne, die Beleuchtungseigenschaften und somit das Aussehen des Ergebnisbildes variieren, vergleiche dazu Abbildung 15 sowie 16.

Veränderung der elektromagnetischen Strahlung in der Atmosphäre

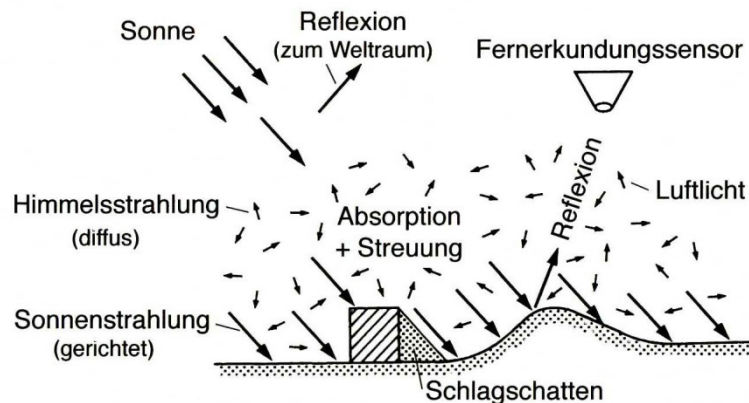


Abb. 15

Natürlich hängt die Reflexion auch von der Wellenlänge ab. Im Bereich von $0,7\mu\text{m}$ steigt die Reflexion von Pflanzen sprunghaft an und variiert mit deren Vitalität. Daher ist das angrenzende nahe Infrarot ($0,7$ bis $1,4\mu\text{m}$) zur Untersuchung von Schäden oder Krankheiten bei Pflanzen hervorragend geeignet. Auch die gespeicherte Wassermenge wirkt sich aus, da Feuchtigkeit eine geringere Reflexion und damit eine dunklere Abbildung bewirkt. Bei Bäumen muß ferner das Laub beachtet werden, da sich die Blattpigmentierung mit den Jahreszeiten ändert. Interessant ist die hohe Variabilität bei Gewässern. Sie reflektieren abhängig von ihrer Tiefe, ihrem Boden und den Beleuchtungsverhältnissen ganz unterschiedlich. Zur Messung des gerichteten Reflexionsgrads dienen Goniometer, Bodenspektrometer und Sonnenphotometer.

Bei der Interpretation von fernerkundlichen Daten der Vegetation ist das Wissen des Aufnahmezeitpunktes wichtig, da die variierenden Sonnenstände und Sensorpositionen Einfluß auf das Aussehen nehmen. Der in der Fernerkundung wiederkehrende bidirektionale Reflexionseffekt ist durch zahlreiche Abbildungen erwiesen, siehe Abbildung 16. Mit bidirektionaler Reflexion sind Unterschiede im aufgenommenen Bild, abhängig vom Winkel zwischen Horizont und Sensor, dem sogenannten bidirektionalen Winkel, gemeint. Dieser Effekt beweist, daß die meisten abgebildeten Flächen eine anisotrope Eigenschaft besitzen. Er spielte bislang keine große Rolle in der Erforschung des Klimawandels, obwohl angenommen wird, daß er von äußerster Wichtigkeit ist. [JEN-07] Sein Einfluß auf erfaßte Daten wird nach wie

vor nicht gänzlich verstanden, wiewohl man von seiner Präsenz in vielen fernerkundlichen Aufnahmen bescheid weiß.

Bidirektionaler Reflexionseffekt bei fixem Sonnenstand

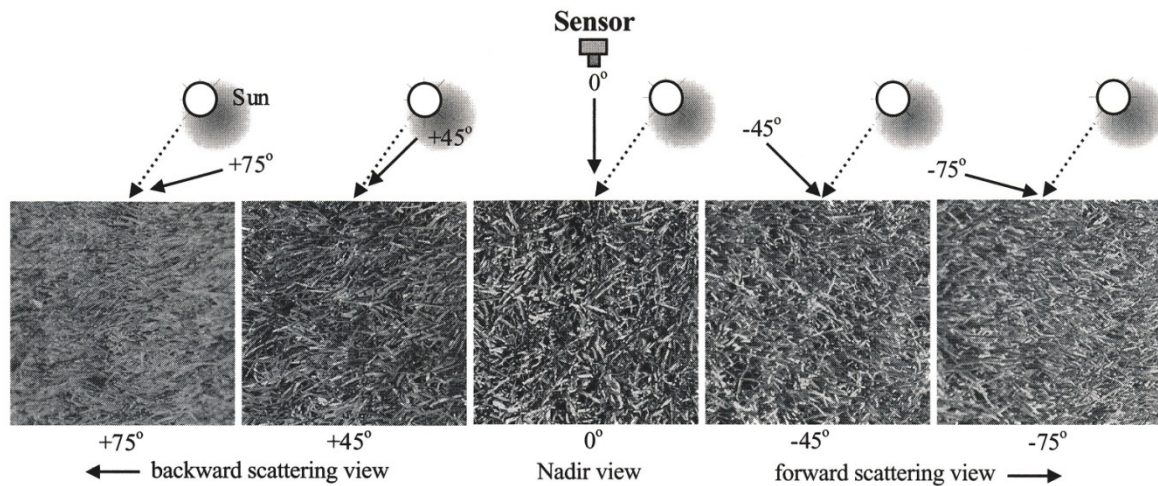


Abb. 16

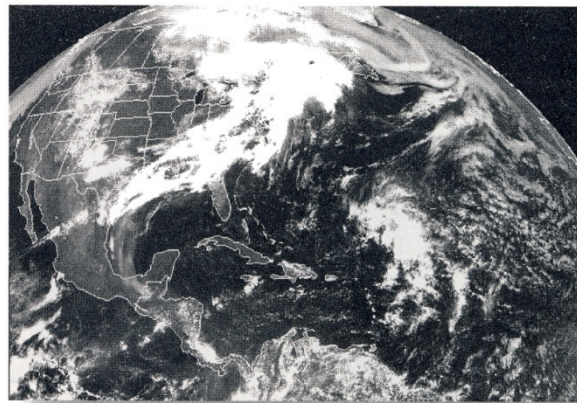
3.2.3 Thermalstrahlung

Jedes Objekt, das Sonnenstrahlung absorbiert, gibt diese als Wärme im thermale Infrarot genannten Kanal wieder ab. Es gilt zu beachten, daß zwischen der Oberflächentemperatur und der ausgesandten Strahlungstemperatur, die nie höher ist, kein einfacher Zusammenhang besteht. Ferner ist die Ermittlung der Oberflächentemperatur kein einfaches Vorhaben, die Strahlungsbilanzgleichung ist unumgänglich. Als Vergleichswert verschiedener Objekte dient der Emissionsgrad ϵ , welcher das Verhältnis der abgegebenen Strahlung eines bestimmten Objekts zu jener des idealen Schwarzen Körpers angibt. [ALB-07] Asphalt z.B. weist einen Wert von ca. 0,95 auf, Schnee und Eis 0,98 bis 0,99. Im thermalen Infrarotbereich von 10 bis 12,5 μm können auch in der Nacht fernerkundliche Aufnahmen gemacht werden. Dadurch ist die 24-stündige Beobachtung des Erdklimas möglich.

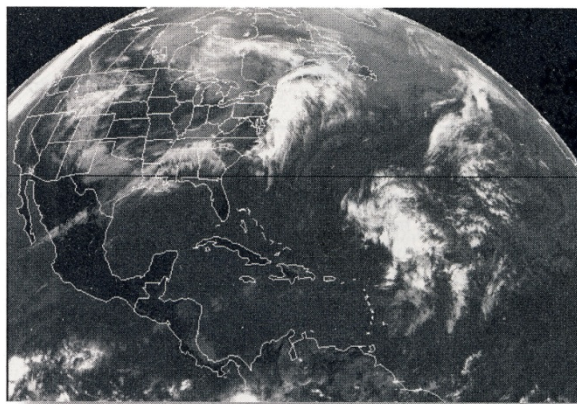
Die bisher beschriebene Methode, das reflektierte Sonnenlicht oder Wärmewellen zu messen, heißt passives Verfahren. Beim aktiven, für das man Mikrowellen nutzt und zu dem das etwas später beschriebene Radar gehört, werden eigens elektromagnetische Strahlen ausgesandt und deren Reflexion aufgenommen.

Die Thermalstrahlung der Erde kann auch mittels Mikrowellen passiv aufgenommen werden, woran großes Interesse besteht. Zwar emittiert die Erde ihre Wärme permanent auch in diesem Spektralkanal, jedoch mit einem sehr schwachen Signal in geringer Menge. Dennoch werden Aufnahmen mittels Radiometer, entweder lotrecht in oder quer zur Flugrichtung gemacht. Die Anwendungsmöglichkeiten sind zahlreich. Advanced Microwave Scanning Radiometer-EOS (AMSR-E) z.B. mißt Wasser- und Wasserdampfmenge, Niederschlag, Wassergehalt des Schnees, Bodenfeuchte, Meeresoberflächentemperatur und -geschwindigkeit sowie Ausdehnung des Meereises.

Der Grad an Absorption und Streuung elektromagnetischer Strahlen in der Atmosphäre ist abhängig von der Wellenlänge. Thermale Strahlen, also solche von ca. 7 bis ca. 13µm (Angaben zur Bandbreite in der Wissenschaft uneinheitlich), werden zwar kaum gestreut, aber stark absorbiert. Daraus folgt, daß die Atmosphäre selbst Strahlung abgibt. Wie unterschiedlich die Aufnahmen eines Gebietes zum gleichen Zeitpunkt unterschiedlicher Wellenlänge sind, zeigt die Abbildung 17, welche die West- bzw. Ostküste der USA, aufgenommen von einem der geostationären meteorologischen Geostationary Operational Environmental Satellites (GOES) am 17. April 1998, jeweils im sichtbaren Bereich und thermalen Infrarot zeigt.



GOES-East visible.



GOES-East thermal infrared.

Abb. 17

3.3 Naturkatastrophen und Fernerkundung

Die Nutzung der Fernerkundung für die Erforschung und Bekämpfung von Naturkatastrophen wird in Katastrophenmanagement, -monitoring und -vorsorge eingeteilt. Ersteres wird faktisch seit Erfindung der Satelliten betrieben, da bereits die Wetterprognose gleichzeitig eine Vorwarnung für Wetterextreme darstellt. Wichtige Bestandteile des Katastrophenmanagements sind Frühwarnsysteme und ausgearbeitete Katastrophenpläne für Entscheidungsträger und die Bevölkerung. [URL-01] Auch das Global Positioning System (GPS) zählt dazu, da dieses satellitengestützte Navigationssystem zur Koordinierung von Einsatzfahrzeugen dient. Ihre Stärke zeigt die Fernerkundung aber besonders in schwer oder nicht zugänglichen Gebieten, gleich ob dies durch die Katastrophe selbst bedingt ist, oder sie sich schlicht in einem abgelegenen Gebiet der Erde zutrug.

Noch jünger ist das Katastrophenmonitoring, also die Beobachtung von Gebieten mit potentieller Gefahr einer Naturkatastrophe bzw. der Entwicklung nach einer Katastrophe. Regelmäßig wiederkehrende Phänomene wie ENSO sind hierbei besonders zur Beobachtung geeignet. Das Monitoring schließt an das Management lückenlos an, indem es Daten unmittelbar vor dem Eintritt der Katastrophe liefert. Das Monitoring bedarf noch einer gründlichen Erweiterung. Denn im Gegensatz zu Wettersatelliten besteht kein ausreichendes System an, auf Naturkatastrophen spezialisierten, Satelliten, das kontinuierlich Daten liefert. Gleiches gilt für die Katastrophenvorsorge.

Von der zunehmenden Leistungsfähigkeit der Satelliten profitiert auch die Umwelt, da Naturkatastrophen Staaten jährlich eine hohe Schadenssumme kosten. Deshalb wird, v.a. in den Industrieländern, in die günstigere Vorsorge investiert. Das aktive Verfahren des Radars ist prädestiniert um vertuschte Umweltsünden aufzudecken, da sich in den, aus seinen Daten gewonnenen, Bildern „künstliche“ Objekte von natürlichen deutlich unterscheiden. Man denke an ausgelaufenes Öl im Ozeanwasser.

Mittels der Radartechnik SAR detektierter Ölteppich

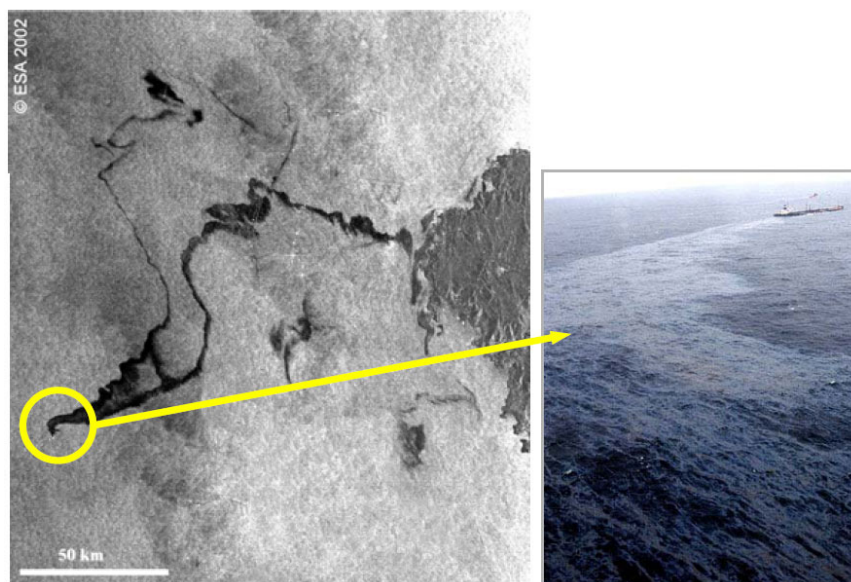


Abb. 18

Abbildung 18 zeigt links auf einem Radarbild das Meer vor der galicischen Küste (helle Fläche) sowie einen Ölteppich (dunkle Linien). Rechts sieht man das aus dem havarierten Tanker

Prestige ausgelaufene Öl von einem Hubschrauber aus. [BAM-06] Abhängig von der Intensität des Backscatters (der Rückstreuung) kann auf die Rauigkeit der Wasseroberfläche geschlossen werden. Dies dient auch zur frühzeitigen Erkennung einer Riesenwelle, wie sie bei einem Tsunami auftritt.

Mittels SAR detektierte Riesenwelle

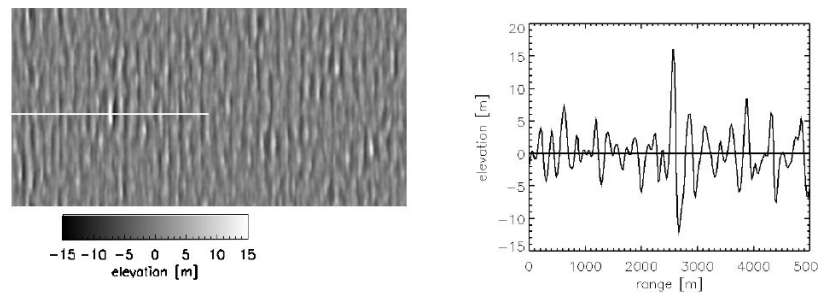


Abb. 19

Auf der obigen Abbildung ist links ein Höhenmodell einer Meeresoberfläche abgebildet. Quer zum waagrechten weißen Strich, entlang dem das rechts abgebildete Höhenprofil verläuft, ist eine lange Welle von 30m Höhe, ca. in der Mitte des Strichs, zu erkennen. Noch deutlicher tritt sie im Profil zu tage.

Die Radartechnik Synthetic Aperture Radar (SAR) kann ebenfalls zur Vulkanbeobachtung, wie es beim sizilianischen Ätna geschah, herangezogen werden, indem sie aus der Distanz des Radarechos von der Erdoberfläche zur Antenne die Höhe des Vulkans ermittelt. Eruptionen bewirken eine Druckentlastung, ein Ausatmen und als Folge gewöhnlich ein Zusammensinken des Vulkans. Eine Wiederbefüllung der Magmakammer bewirkt die gegenläufige Bewegung. [URL-01] Durch mehrfache Messungen sind die Höhenunterschiede eruierbar, was mittels des European Remote Sensing Satellites (ERS) beim Ätna erfolgreich durchgeführt wurde.

Die technischen Möglichkeiten um nach und teilweise vor Naturkatastrophen wichtige Informationen für Betroffene mit Hilfe der Fernerkundung zu ermitteln, sind in den letzten Jahrzehnten beträchtlich gestiegen. Die beste Information hilft aber nur, wenn sie auch ankommt

und verstanden wird. Satellitenbilder von Krisengebieten sollten stets Geoinformationen zur besseren Orientierung, z.B. Gitternetze, enthalten um an Aussagekraft zu gewinnen.

3.4 Dürre in der Fernerkundung

Dürre und Desertifikation sind Naturkatastrophen, die als leicht beobachtbar, verglichen z.B. mit einem Tsunami oder Hangrutsch, einzustufen sind, denn sie treten nicht abrupt ein. Ihre Prognose hingegen erweist sich als schwierig, da nur Indizien für eine mögliche Dürre existieren, z.B. ein im thermalen Infrarot gegenüber früheren Messungen wärmer erfaßter Boden. Prinzipiell gilt, daß auf eine bevorstehende Dürre durch ausbleibenden Niederschlag, verringerte Bodenfeuchte und kranke Vegetation geschlossen wird. Es gibt keine spezifischen Erkennungsmuster in fernerkundlichen Bildern, die auf eine künftige Dürre schließen lassen. Die Desertifikation bezeichnet den Prozeß der Wüstenbildung, quasi die Spätfolge einer extremen Dürre, bei der die Vegetation ausgelöscht wird. Sie findet in zahlreichen physiogeographischen Werken ausführliche Beschreibungen, weshalb an dieser Stelle nicht näher auf sie eingegangen wird. Mehrere Aufnahmen verschiedener Satelliten, Television Infra-Red Observing Satellite (TIROS) mit Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR), Système Probatoire d'Observation de la Terre (SPOT), Landsat TM oder Meteorological Satellite (METEOSAT) und Meteosat Second Generation (MSG), helfen eine nahende Katastrophe als richtig zu erkennen, wodurch eine Prognose leichter, als etwa bei oben genanntem Tsunami gemacht werden kann, für den vielleicht nur ein Satellit eine günstige Aufnahmeposition hatte. Fehllarme sind bei Trockenperioden also weitgehend auszuschließen, zumal heutzutage genaue Wetterprognosen, essentiell zur Erkennung einer möglicherweise bevorstehenden Dürre, die Regel sind. Eine erfolgreiche Alarmierungsquote gilt aber wohl gemerkt nur für Trockenperioden. Die Vorhersage einer danach folgende Dürre kann höchstens regional, für eine Fläche von z.B. rund 5000km², gemacht werden, nicht aber für die landwirtschaftlich bebauten Flächen eines Dorfes. Es sei auch auf den derzeitigen Klimawandel verwiesen, der, als verläßlich geltende Muster, auf unerwartete Weise verändern kann. Damit stehen die Meteorologie als auch die Fernerkundung in den nächsten Jahren vor einer großen Herausforderung. Bis heute konnte mittels Fernerkundung ein vermehrtes Auftreten von Dürren, gleich welcher Art, global nicht verifiziert werden. Wohl aber sind häufigere Dürren auf regionalem Gebiet nachgewiesen, z.B. das seit Jahrzehnten in China vorhandene

Northern Drying. Für die Südstaaten Europas wird in Zukunft mit häufigeren Dürren gerechnet.

Konkret werden Aufnahmen der Landnutzung, des Boden- und Pflanzenfeuchtegehaltes, der Gesundheit des angebauten Getreides und der natürlichen Vegetation ausgewertet. Dienbare Spektralkanäle sind neben dem sichtbaren Bereich das Nahe Infrarot (NIR) sowie Mikrowellen. Methoden der Bildverarbeitung wie –auswertung werden abhängig vom verfolgten Ziel angewandt, wobei sich aber nur wenige Möglichkeiten für Dürre bilden. Dürre ist als Katastrophe auch deshalb leicht handhabbar, da für sie eine geometrische Auflösung von eins bis 80km [URL-15] ausreicht. Ergebnisse sind entweder Bilder, die zu Karten verarbeitet werden, oder Parameter sowie Indizes. Die große Bandbreite an Vegetationsindizes in der Fernerkundung ist ein nützliches, wichtiges Instrument. Zusammen mit Klimamodellen lassen sich recht genaue Prognosen für Trockenperioden ermitteln.

Die für die Dürre eingesetzte Fernerkundung konzentriert sich auf Objekte am bzw. Eigenschaften im Erdboden. Zahlreiche Informationen wie Bodenfeuchte oder -textur können auch in situ, oft mit höherer Genauigkeit als aus der Luft, erhoben werden. Wie kann da die Fernerkundung noch sinnvoll genutzt werden? Zur Erstellung von Bodenkarten ist sie unerlässlich. Diese wiederum stellt ein wertvolles Instrument für Bodenkundler dar, da sie den gesamten Boden einer Fläche, inklusive unzugänglichem Gebiet, beinhaltet. Unter bestimmten Bedingungen ist die fernerkundliche Messung genauer als in situ. Ein aufgenommenes Bild weist gemäß Abbildung 20 abhängig von vorhandenen Bodenhorizonten Unterschiede auf. Es variiert aber noch aufgrund weiterer Bodeneigenschaften:

- Oberflächenrauigkeit
- Bodentextur
- Bodenfeuchte
- Anteil organischen Materials
- Menge an Eisenoxid
- Salzgehalt

Die Reflexion steigt mit zunehmender Wellenlänge, v.a. im sichtbaren Bereich, im NIR und Mittleren Infrarot (MIR).

Verhalten elektromagnetischer Strahlung an Böden unterschiedlicher Horizontmächtigkeit

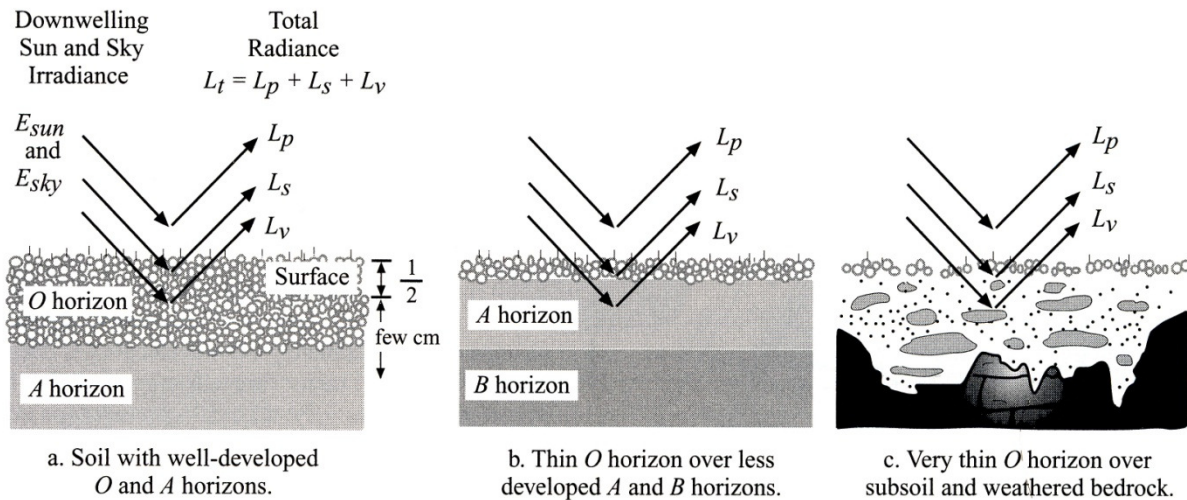


Abb. 20

Jene den Erdboden angepeilte Strahlung reflektiert auf drei Arten. In der Atmosphäre, auf der Erdoberfläche und im Boden. Ersteres ist unerwünscht, da dadurch die Aufnahme des Meßobjekts verdünnt wird und muß radiometrisch abgezogen werden. Die Wellenlänge der Strahlen, welche in den Erdboden ein- und wieder ausdringen (Volumenstreuung) beeinflusst die Eindringtiefe. Grundsätzlich kann man sagen, daß sie mit zunehmender Wellenlänge steigt. Im sichtbaren Bereich wird sie nur ein paar Millimeter betragen, was zu gering für Aussagen ist. Der Anteil der Volumenstreuung hängt aber noch von weiteren Faktoren ab:

- Art und Menge an (an)organischem Material
- Form und Dichte der Mineralien sowie
- Bodenfeuchte.

Ein Boden reflektiert auch abhängig vom vorherrschenden Anteil seiner Bodentextur, wie Abbildung 21 zeigt.

Vom Feuchtigkeitsgrad und der Korngröße abhängiger Reflexionsgrad elektromagnetischer Strahlung

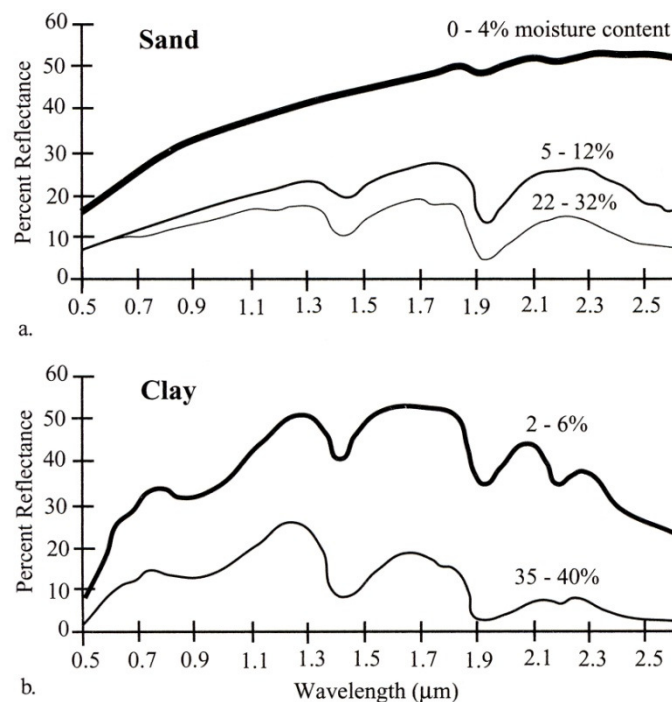


Abb. 21

Man nehme dazu an, daß der Boden nackt ist. Mit zunehmender Wellenlänge weist Sand einen kontinuierlichen, langsam abschwächenden Anstieg an Reflexion auf. Dies gilt aber nur für trockenen Sand. Ein bis zu 32 Prozent feuchter ähnelt in seiner Reflexionskurve schon mehr dem Ton. Dort sind die spektralen Absorptionsbereiche bei 1,4 und 1,9µm klar erkenntlich. Eindeutig sichtbar ist die abnehmende Reflexion einfallender Strahlen bei zunehmender Feuchte. Ein geübter Photoanalytiker wird berücksichtigen, daß ein Boden wesentlich dunkler abgebildet ist, wenn die Aufnahme nach intensiven Niederschlägen gemacht wurde. [JEN-07] Im Gegensatz ist der stärker reflektierende trockene Boden hell am Bild. Ebenso wird er Bodentypen anhand ihrer rötlichen Färbung als solche hohen Eisenoxidgehalts erkennen. Umgekehrt ist der Reflexionsanteil von Grün und Blau bei Böden mit Eisenoxid gering.

Weiter oben wurde angedeutet, daß auch der Anteil organischen Materials, also abgestorbene Pflanzen und Lebewesen an der Erdoberfläche, Einfluß auf die Reflexionscharakteristik nehmen. Hier gilt wie bei Wasser, daß eine große Menge mehr Absorption einfallender Strahlen bewirkt.

The graph plots Reflectance (%) on the left y-axis (0 to 100) and Atmospheric Transmission (%) on the right y-axis (0 to 100) against Wavelength in micrometers (μm) on the x-axis (0.4 to 2.6). The top of the graph is divided into three regions: 'Leaf pigments in the palisade mesophyll: chlorophyll *a*, *b* β-carotene, etc.' (0.4 to ~0.7 μm), 'Scattering in the spongy mesophyll' (~0.7 to ~1.4 μm), and 'Leaf water content' (~1.4 to 2.6 μm). The bottom of the graph is divided into four spectral regions: 'Visible' (0.4 to ~0.7 μm), 'Near-infrared' (~0.7 to ~1.4 μm), 'Reflective infrared' (~1.4 to ~2.0 μm), and 'Middle-infrared' (~2.0 to 2.6 μm). Two curves are shown: a solid line for reflectance and a dashed line for atmospheric transmission. The reflectance curve shows a sharp peak at ~0.45 μm (labeled 'Blue'), a smaller peak at ~0.55 μm (labeled 'Green'), and a dip at ~0.65 μm (labeled 'Red'). These are collectively labeled 'Primary chlorophyll absorption bands'. The atmospheric transmission curve shows several deep absorption bands, with three labeled 'Atmospheric water absorption bands' at approximately 1.4 μm, 1.9 μm, and 2.2 μm.

Abbildung 22 zeigt, daß die Reflexion einer Vegetation, wie jene des Bodens, stark wellenlängenabhängig ist. Die schwarze Linie gibt, an der linken Ordinate ablesbar, den Grad der Reflexion wieder, die aber nur dann aufgenommen werden kann, wenn die Atmosphäre Durchlässigkeit gewährt. Die schwarzen Flächen geben gemäß der rechten Ordinate die Undurchlässigkeit an.

59

Grün. [JEN-07] Auch sie müssen berücksichtigt werden. Bei Äckern erweist es sich als vorteilhaft, wenn man zusätzlich über die Anbaumethode des Bauern bescheid weiß.

Unterschiedlicher Absorptionsgrad verschiedener Blattpigmente

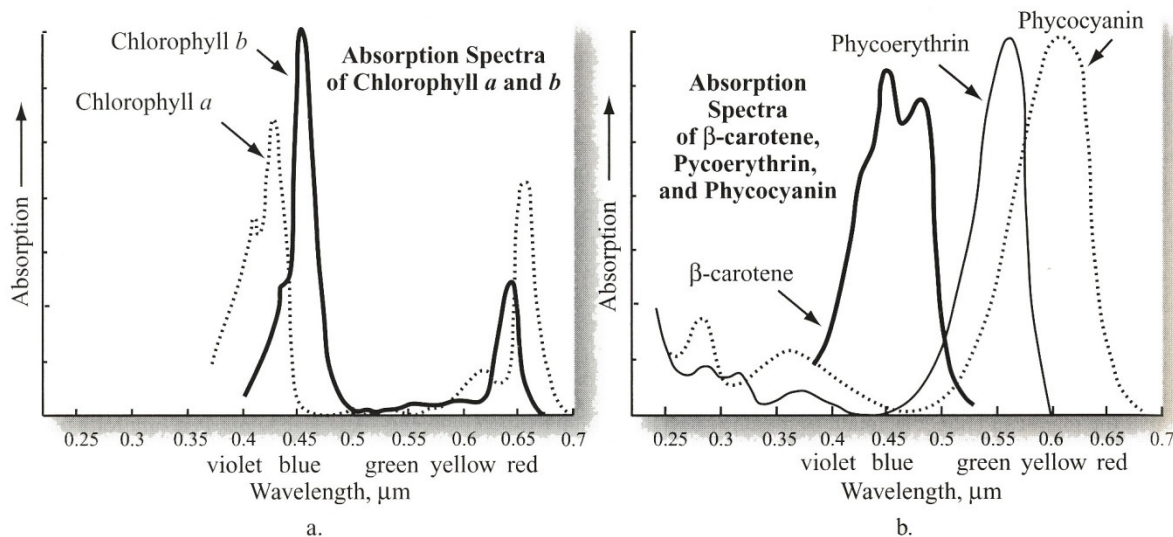


Abb. 23

Die Möglichkeit zahlreicher Aufnahmen eines von Dürre bedrohten Gebietes mag vielleicht wie eine erste Lösung des Dürreproblems erscheinen, jedoch müssen die Daten erst an Betroffene übermittelt werden. Dies stellt insbesondere in Ländern der Dritten Welt oft ein großes Problem dar, da die Bevölkerung oft nicht einmal ein Radio besitzt und der Urbanisierungsgrad, in Städten ist die mündliche Überlieferung leichter, mitunter gering ist. Weiters muß berücksichtigt werden, daß das Wissen um Satellitenbilder unter Landwirten auch in reichen Ländern begrenzt ist und sie ihrem Wissen über Anbau mehr vertrauen. Diejenigen, die von einer nahenden Dürre wissen, haben aber selbst nicht oft die Chance, neues Land zu besiedeln. Geldmangel, politische Autorität oder auch kriegerische Auseinandersetzungen sind hierfür ausschlaggebend und diktieren in einem noch größeren Maß eine erzwungene Migration. Die Kollaboration zwischen mit Fernerkundung arbeitenden Organisationen und lokalen Wetterbehörden liefert zumindest im Bereich der Informationsverbreitung Abhilfe.

3.4.1 Natürliche Vegetation

Der Gesundheitszustand einer Vegetation liefert gute Indizien einer möglichen Dürre. Die Vegetation ist für die Fernerkundung prinzipiell von großer Bedeutung, da 70 Prozent der Festlandfläche von Pflanzen bedeckt sind und diese den wichtigsten Teil des Ökosystems Erde darstellen. Klimatische und physiogeographische Eigenschaften von Land werden massiv von Vegetation geprägt. Wissen über Veränderung der Pflanzenarten, des Pflanzenwachstums und Modifizierungen in der Morphologie geben hierfür einen wertvollen Einblick.

Die Photosynthese ist ein energiesparender, hauptsächlich in den Blättern einer Pflanze stattfindender Prozeß in Gegenwart von Sonnenlicht. [JEN-07] Dieses wird in Glucose, einem Zuckermolekül ($C_6H_{12}O_6$), gespeichert, welches wiederum aus dem CO_2 der Atmosphäre und dem über die Wurzeln aufgenommenen Wasser (H_2O) in den Chloroplasten gebildet wird. Dabei verbreitet sich als Nebenprodukt Sauerstoff in die Atmosphäre. Der Prozeß beginnt sobald Sonnenlicht auf die Chlorophyll enthaltenden Chloroplasten trifft. Dabei richten die Pflanzen ihre innere und äußere Struktur so aus, daß die Photosynthese möglichst effektiv abläuft. Dies ist für die Fernerkundung von Bedeutung, da sich damit die Struktur der Vegetation, aus der Luft gesehen, sowie die Interaktion der Pflanzen mit elektromagnetischer Energie ändert und Blätter wie Kronendächer spektral in der Aufnahme variieren.

Elektromagnetische Strahlung wird von der Kutikula und oberen Epidermis eines Blattes transmittiert, siehe Abbildung 24. Die an der Oberseite des Blattes gelegene Epidermis hat eine Keratin-ähnliche Oberfläche, die Licht streut, aber nur geringfügig reflektiert. [JEN-07] Die Chlorophyll-Pigmente im darunter gelegenen Palisadengewebe nehmen einen bedeutsamen Einfluß auf absorbierte und reflektierte Strahlen des sichtbaren Lichts, jene im nach unten folgenden Schwammgewebe auf Absorption und Reflexion des nahen Infrarots. Das Schwammgewebe ist jener Ort, an dem CO_2 und O ausgetauscht werden und Reflexion wie Transmission hohe Werte von 40 bis 60 Prozent erreichen.

Gedachter Querschnitt eines Blattes

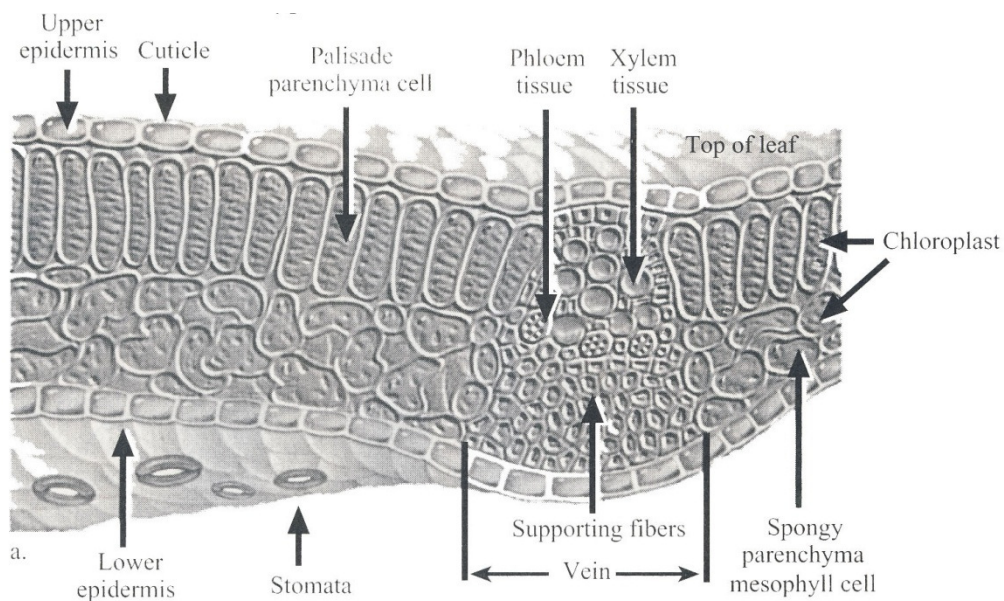


Abb. 24

Steht eine Pflanze unter Belastung und/oder nimmt die Chlorophyllproduktion ab, führt der Mangel an Chlorophyllpigmenten zu verringerter Absorption und erhöhter Reflexion v.a. im grünen und roten Bereich des sichtbaren Lichts, was zu einem eher gelblichem Bild führt. Eine Zunahme an Reflexion dieses Spektralbereichs ist somit ein bedeutsamer Indikator für eine Erkrankung der Pflanze. Gesunde Blätter einer Pflanze weisen eine abrupte Zunahme an Reflexion im Band 0,7 bis 1,2 μm auf, während sie die elektromagnetische Energie im blauen und roten Bereich stark absorbieren, jene Wellenlängen zu denen einfallendes Licht für die Photosynthese benötigt werden.

Der Hauptgrund für die große Reflexion eines Blätterdachs im NIR mittels des Schwammgewebes liegt, neben den bereits erwähnten rund 50 Prozent an direkter Reflexion, an der sogenannten additiven Blattreflexion. Diese soll anhand eines Modells kurz erläutert werden. Von der einfallenden Sonnenstrahlung werden annähernd 50 Prozent auch transmittiert. Liegt nun ein zweites Blatt unter dem ersten, so wird erneut die Hälfte jeweils reflektiert und transmittiert, weshalb 25 Prozent der ursprünglichen Strahlung Blatt eins auf der Unterseite treffen. 12,5 Prozent gelangen durch Blatt eins und werden vom Sensor empfangen. Daraus folgt, daß je größer die Zahl an Blattschichten eines gesunden Kronendachs, desto höher die Reflexion im NIR ist. [JEN-07] Besteht, was nur in Ausnahmefällen vorkommt, nur eine Blattschicht, so

ist die Reflexion deutlich niedriger, da die den Erdboden treffende Strahlung mehrheitlich absorbiert wird. Bei Alterung der Blätter nimmt die Reflexion ab. Eine Skizze des in diesem Absatz erläuterten Sachverhalts bietet Abbildung 25.

Schematischer Ablauf der additiven Blattreflexion

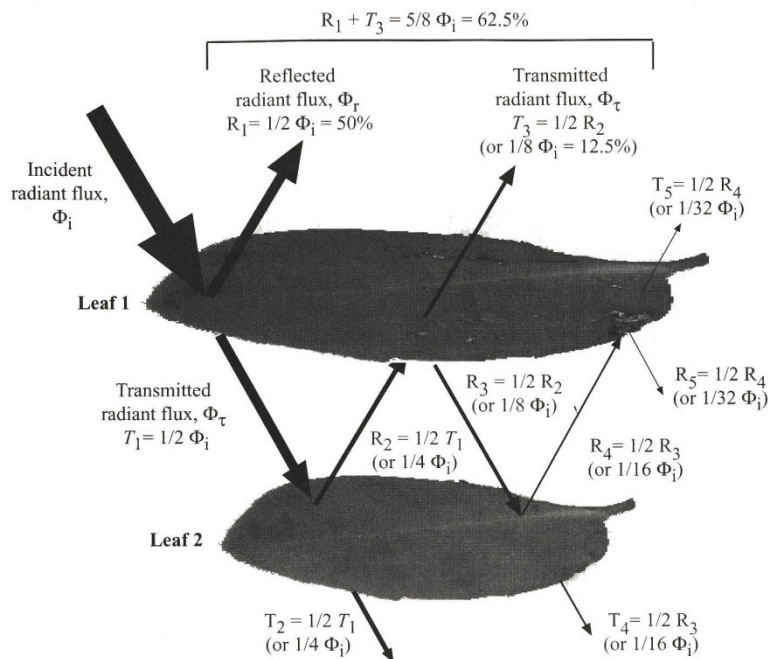


Abb. 25

Möchte man verschiedene Vegetationstypen identifizieren oder nähere Informationen wie Biomasse oder Chlorophyll-Eigenschaften mittels Fernerkundung erheben, so ist die Wahl des Zeitpunkts der Aufnahme von großer Bedeutung. Ein detailliertes Wissen über den phänologischen Kreislauf ist zur Interpretation notwendig, da nicht alle Pflanzen immergrün sind. Dieser ist ebenso für die Menge an Unterholz, welche in der Aufnahme die Zahl der Layer bilden, ausschlaggebend. Daher muß ein Interpret genau über den Stand der Pflanze bescheid wissen.

Auch wenn für nahezu jede Pflanze ihr phänologischer Kreislauf je nach Region eruierbar ist, kommt es zu geringfügigen Unterschieden, bedingt durch die Anbaumethoden verschiedener Bauern. Deshalb ist es notwendig, auch Kenntnisse über lokale Anbaumethoden zu haben. Nicht vergessen darf der Wettereinfluß werden, welcher den phänologischen Zyklus um bis zu 30 Tage verschieben kann. Daher muß der Interpret bescheid wissen, ob die Aufnahme in

einem typischen oder atypischen Jahr erfolgte. Es erwies sich als sinnvoll Daten am Beginn des phänologischen Kreislaufs, auf der Nordhalbkugel Februar bis Mai, zu erheben, da sich in späteren Monaten die Vegetationen einerseits mehr ähneln und andererseits der vollständig entwickelte Kronenschlußgrad die Sicht beeinträchtigt. Aber natürlich hängt die Wahl des Zeitpunkts in erster Linie vom verfolgten Ziel ab. Möchte man z.B. die Biomasse erheben, ist es ratsam Aufnahmen dann zu machen, wenn die Pflanzen ausgewachsen sind.

3.4.2 Wassergehalt von Pflanzen

Für die fernerkundliche Erforschung von Dürre sind Pflanzen ein wertvolles Meßobjekt. Gerade Wasser spielt hier eine zentrale Rolle, fällt doch die Periode des stärksten Pflanzenwachstums meist in jene des häufigsten Niederschlags. Der Sättigungsgrad einer Pflanze an H_2O ist ein wichtiger Indikator. Leider gibt es kein spezielles Meßinstrument zur Erfassung des Grades an Wasser, das eine Pflanze in ihren Wurzeln, ihrem Stengel und ihren Blättern hält. Immerhin liefern Aufnahmen im Bereich des mittleren wie thermalen Infrarots sowie der Mikrowellen brauchbare Informationen dazu. Wasser absorbiert v.a. Wellen des mittleren Infrarots. [JEN-07] Demnach ist die Reflexion einer Pflanze in diesem Spektralbereich um so größer, je geringer sie mit Wasser gesättigt ist. Man beachte, daß diese Aussage erst ab einer Wellenlänge von zumindest $3\mu m$ gilt, zumal sie ja Abbildung 21 widerspricht. Eine große Menge des in einer Pflanze enthaltenen Wassers verdunstet mittels Transpiration, wobei die Wärme der Sonne das in den Blättern gespeicherte Wasser in Wasserdampf umwandelt, welches über die Stomata austritt. Dieser Prozeß

- kühlt die Innenseite der Blätter, da der entweichende Wasserdampf Wärme fortführt
- hält den Wasserfluß über die Wurzeln und den Stengel aufrecht
- der eine beständige Zufuhr an Mineralstoffen aus dem Boden gewährleistet.

Das transpierte Wasser kann eine große Menge erreichen, weshalb der Nachschub über die Wurzeln sehr wichtig ist. Gibt es dabei Probleme, beginnen die Blätter zu verwelken, die Photosynthese wird angehalten und in Folge stirbt die Pflanze. Daher liefert die Beobachtung des Feuchtigkeitsgrades der Pflanzendecke, welcher mit der Transpiration korreliert, wertvolle Informationen über die Gesundheit oder den Stand der Vegetation.

3.4.3 Vegetationsindizes

Seit den 1960ern haben Wissenschaftler Vegetations-Größen mit Hilfe der Fernerkundung entwickelt. Diese Fortschritte involvierten oft Vegetationsindizes, Messungen, die die Präsenz und Absenz von grüner Vegetation erfassen, wie z.B. der Leaf Area Index (LAI), die Absorbed Photosynthetically Active Radiation (APAR, für die Photosynthese benötigte Sonnenenergie im Bereich 0,4 bis 0,7 μ m) oder die prozentuale Grünbedeckung des Festlandes.

Folgendes sollte ein Vegetationsindex erfüllen:

- Die Sensibilität für die biophysikalischen Parameter einer Pflanze bei möglichst vielen Bedingungen maximieren.
- Parameter wie Winkel der Sonneneinstrahlung, Betrachtungswinkel oder die Atmosphäre für konsistente räumliche und zeitliche Vergleiche normalisieren.
- Die inneren Wirkungen wie die Hintergründe der Pflanzendecke, also z.B. Hangrichtung und Neigung, Bodeneigenschaften oder gealterte Vegetation normalisieren.
- Mit anderen Vegetationsparametern (LAI oder APAR) koppelbar sein, um die Gültigkeits- und Qualitätskontrolle zu erleichtern.

Indizes sollten die Beziehung zwischen Rot und NIR, auf gesunde Vegetation bezogen, nutzen. Schon vom Simple Ratio (SR) Index, dem Verhältnis zwischen reflektiertem Rot und reflektiertem NIR, erhält man wertvolle Information über Biomasse.

3.4.4 Leaf Area Index

Der LAI (Blattflächenindex) ist eine wichtige Kennzahl für die Belaubungsdichte der Pflanzendecke. Er bezeichnet das Verhältnis zwischen der einseitigen Blatt- sowie Nadelfläche zu einer bestimmten Bodenoberfläche. Voraussetzung ist, daß die Zahl der Blätter je Pflanze und die Zahl an Pflanzen je Flächeneinheit annähernd korrekt geschätzt werden. Der LAI ist bedeutsam, da er die Fläche, die mit der Sonnenstrahlung wechselwirkt und einen hohen Anteil

des Impulses der aufgenommenen Strahlung kennzeichnet. Weiters, da es sich um jene Fläche handelt, die für die Absorption an Kohlenstoff verantwortlich ist. Manche Kronendächer haben einen erheblich größeren LAI als andere. Die Leaf Area Density (LAD) errechnet sich aus dem LAI, indem dieser durch die Bestandshöhe dividiert wird. Betrachtet man einzelne Bestandsschichten, ergibt sich die LAD aus dem LAI pro Kubikmeter. [URL-07] Dabei muß erwähnt werden, daß bei manchen Blättern eine horizontale, bei manchen eine vertikale Lage vorherrscht. Die Fernerkundung bietet vor allem für die großflächige Bestimmung dieses biologischen Parameters eine ideale Technologie. [URL-01]

Leaf Area Index Amazoniens und Umgebung 1999



Abb. 26

Der Regenwald Amazoniens besitzt ein Gewirr an verschiedenen Vegetationsschichten, weshalb der in ihm gemessene LAI stark variiert. Dies ebenso durch den Wechsel von Regen- und Trockenzeiten, was erst 2007 herausgefunden wurde. Dieser Grund der Schwankung wurde durch Messungen der Blattoberfläche aufgedeckt, die vom Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) an Bord des National Aeronautics and Space Administration (NASA) Satelliten Terra durchgeführt wurden. [URL-26] Abbildung 26 stellt einen mehrjährigen durch MODIS gewonnenen Durchschnitt des LAI dar.

3.4.5 Normalized Difference Vegetation Index

Die hohe Sensibilität der grünen Vegetation im roten wie im infraroten Bereich in Form großer Reflexion macht man sich mittels zahlreicher Kennzahlen, wie dem Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), zunutze, um die Biomasse schätzen zu können. Dieser von Rouse et.al. 1974 entwickelte Vegetationsindex errechnet sich aus

$$(R_{\text{NIR}} - R_{\text{Rot}}) / (R_{\text{NIR}} + R_{\text{Rot}}).$$

Er ist ein wichtiger Index, weil jahreszeitliche und jährliche Veränderungen im Vegetationswachstum beobachtet werden können und seine Berechnung viele Arten von Störungen reduziert (Unterschiede des Sonnenlichts, Wolkenschatten, Verdünnung elektromagnetischer Strahlen durch die Atmosphäre, Normalisierung mancher topographischer Parameter).

Sein Nachteil ist, daß er als nicht linearer Index anfällig für additive Störungen ist (Himmels- oder Luftlicht). Der NDVI korreliert stark mit dem LAI, was aber v.a. bei einem hohen LAI geringer ausfällt. Weiters reagiert er sehr sensibel auf den Hintergrund des Kronendachs von Bäumen, also den Erdboden. Er fällt höher aus bei dunkleren Hintergründen.

Um negative Werte zu vermeiden, wird zum NDVI 0,5 addiert. Zieht man vom Ergebnis die Quadratwurzel erhält man den Transformed Vegetation Index (TVI). Wie SR und NDVI reagiert er auf Veränderungen in der Vegetationsmasse.

3.4.6 Vegetation Condition Index

Der Vegetation Condition Index (VCI) ist ein Indikator für die Vitalität der Vegetation als Funktion des NDVI.

$$\text{VCI} = (\text{NDVI} - \text{NDVI}_{\text{min}}) / (\text{NDVI}_{\text{max}} - \text{NDVI}_{\text{min}})$$

Dieser Index bezieht sich auf eine Periode von zehn Tagen mehrerer Jahre. Er ist der Versuch, zwischen dem kurzfristigen, wetterbasierten Signal und dem langfristigen, klimabasierten

Signal, durch Reflexion der Vegetation ausgedrückt, zu unterscheiden. In diesem Sinne ist der VCI ein besserer Indikator für Streß durch Wasserknappheit als der NDVI. [VOG-00] Der VCI besitzt keine Einheit, reicht von null (schlechteste Bedingungen) bis eins (beste Bedingungen).

3.4.7 Bodenfeuchte

Zur Prognose und Einschätzung von Dürre ist die fernerkundliche Messung der Bodenfeuchte gut geeignet. Sie liefert darüber seit den 1960ern flächenhafte Information und ist der in situ Messung in vielen Bereichen überlegen. Aufschwung erfuhr sie v.a. durch den vermehrten Einsatz der SAR-Technik in den 1990ern. Eine gemessene Fläche kann von wenigen Quadratmetern bis zu tausenden Quadratkilometern reichen. Viele Wissenschaftler unterscheiden daher zwischen zwei Maßstäben. Jenem unter 100m werden mit Pflanzen, Bodentyp und -relief die primären Einflußfaktoren für Bodenfeuchte zugeschrieben. Jener mit einigen Kilometern hat atmosphärische Einflüsse, bedingt durch klimatische Ereignisse wie großflächige Niederschläge oder Unterschiede in der Evaporation, als Hauptkomponenten. Die fernerkundlichen Eigenschaften von Wasser sind nicht direkt auf einen feuchten Boden übertragbar.

Wie wichtig die Bodenfeuchte für die Einschätzung von Naturkatastrophen ist, zeigten die Überschwemmungen in Österreich des Jahres 2002, welche in zwei Perioden, vom 7. bis 9. sowie 11. bis 13. August geschahen. Obwohl im zweiten Zeitraum weniger Niederschlag fiel, war dessen Überschwemmung in vielen Einzugsgebieten größer, da der Boden durch die erste mehr mit Wasser gesättigt, ergo die Bodenfeuchte höher war.

Einen für Bodenfeuchte prädestinierten Spektralkanal stellen die Mikrowellen dar. Denn sie können mit abnehmender Frequenz bei günstigen Bedingungen wie frostfreien, trockenen Boden bis zu einen Meter tief in den Boden eindringen, weshalb ein langwelliger Kanal am besten dafür geeignet ist. Bei hoher Bodenfeuchte nimmt die Eindringtiefe ab. Man macht sich dies für die Messung der Profilfeuchte zunutze, wobei Mikrowellen seit den 1970ern hierfür angewandt werden. Verbesserte Algorithmen brachten die Wissenschaft auf diesem Gebiet in den letzten Jahren einen großen Schritt vorwärts. Das IPF der TU Wien befaßt sich ausführlich mit Bodenfeuchtedaten die mittels Radar erfaßt wurden. Um die Ergebnisse bes-

ser zu verstehen, ist ein Hintergrundwissen zu diesem fernerkundlichen Verfahren notwendig weshalb es in Kapitel 3.5 noch besprochen wird.

3.4.8 Niederschlag

Eine Niederschlagsmessung mittels Fernerkundung läßt sich gegenüber einem in situ-Niederschlagsmesser stets nur indirekt durchführen. Man muß der an Wolken und Partikeln entstehenden Reflexion vertrauen. In den Anfangstagen der Fernerkundung glaubte man durch die Helligkeit vom auf Wolken reflektierten Sonnenlicht im sichtbaren Bereich und NIR auf die Wolkendicke und folglich die Wahrscheinlichkeit, daß Wolken Regen mit sich führen, schließen zu können. Leider lassen nicht alle hellen Wolken Regen auf die Erde aus. In ähnlicher Weise nahm man an, daß, je kälter die Oberseite einer Wolke ist, desto wahrscheinlicher aus ihr Regen fallen würde. Es gibt jedoch Wolken mit kalter Oberseite, aus denen kein Niederschlag fällt. Bis heute wurden dennoch Schätzmethoden im sichtbaren Bereich und Infrarot entwickelt.

Ein Meilenstein in der Niederschlagserfassung via Satellit war die Erfindung von Mikrowellen-Sensoren, die auf direkterem Weg Wasser in Wolken erkannten. 1987 wurde Special Sensor Microwave Imager (SSM/I) mit einem Hochfrequenzkanal von 85,5GHz ins All geschossen. In der Tat reduzieren Wassertropfen und Eiskristalle in Wolken deren Helligkeit. Die Messung von Regen mit passiven Sensoren des Mikrowellenbereichs bringt Schwierigkeiten mit sich. Wahrscheinlich werden künftig verbesserte Niederschlagsdaten erhältlich sein. Vor allem die vorgeschlagene Global Precipitation Measurement (GPM) Mission, bestehend aus acht oder mehr Satelliten, könnte eine dreistündige Probe über Niederschlag eines Punktes beliebiger Koordinaten zu 90 Prozent der Zeit bieten. Die für den Niederschlag wichtigen, als Kondensationskerne für Wassertröpfchen dienenden und das Erdklima abkühlenden Aerosole, sind in ihrer Menge und Verbreitung in der Atmosphäre fernerkundlich trotz 20jähriger Forschung noch nicht erfassbar.

Wolken spielen eine große Rolle in der Bestimmung des Erdklimas. Mehr als irgendeine andere Komponente des Klimasystems bestimmen sie den Energiefluß in der Erdatmosphäre. Der Wolkentyp ist im sichtbaren wie thermalen Bereich eruierbar, ersichtlich in Abbildung

27. Der Bildauswerter rechnet einzelne Pixelwerte aus beiden Spektralkanälen in das Diagramm um, woraus Flächen entstehen in denen man den Wolkentyp lokalisieren kann.

Detektion von Wolkentypen mittels thermalen Infrarots und dem sichtbaren Bereich

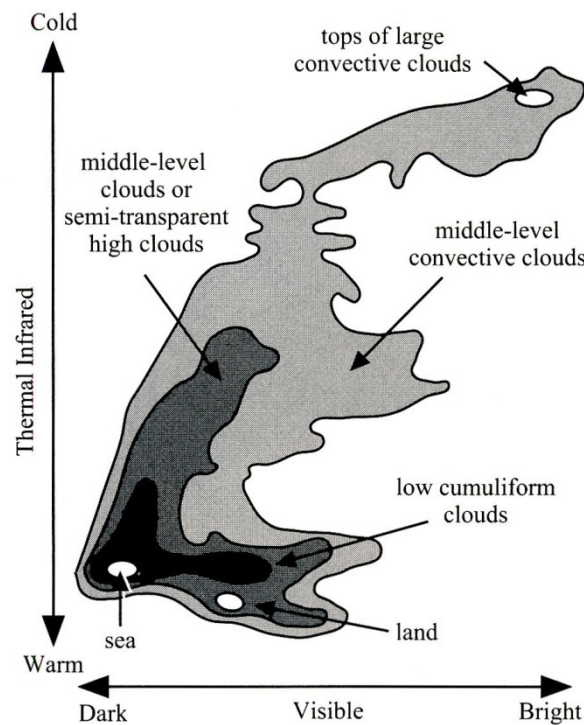


Abb. 27

Die Erfassung durch Radar lässt sich z.B. mit einem der 150 Next-Generation Radar (NEX-RAD) Systemen, 50 Meter über der Erdoberfläche, durchführen. Nur ein Bruchteil der ausgesandten Mikrowellen kehrt direkt zum Sensor durch ein Radome zurück. Die Intensität des reflektierten Pulses wird in Dezibel, dazu die seit der Emission bis zum Auffangen des reflektierten Signals vergangene Zeit sowie der Dopplereffekt des Pulses gemessen.

Man kann mit Hilfe von Satelliten auch Wasserdampf auf Bildern erfassen, z.B. eignen sich eine Wellenlänge von $6,7\mu\text{m}$ bzw. der Kanal 10 bis $12\mu\text{m}$ bei GOES.

3.5 Radaraufnahme

Die meisten Fernerkundungsverfahren wie die photographische Aufnahme und jene mittels Zeilen- oder Rotationsscannern, haben ähnliche Eigenschaften. Ihr Ergebnis ist ein Bild, das wetterabhängig sowie von der Sonne, Einfallswinkel der Sonnenstrahlen, Helligkeit, etc., beeinflusst wird. Davon unterscheidet sich das Radar grundsätzlich.

Lage wichtiger Radarkanäle im elektromagnetischen Spektrum

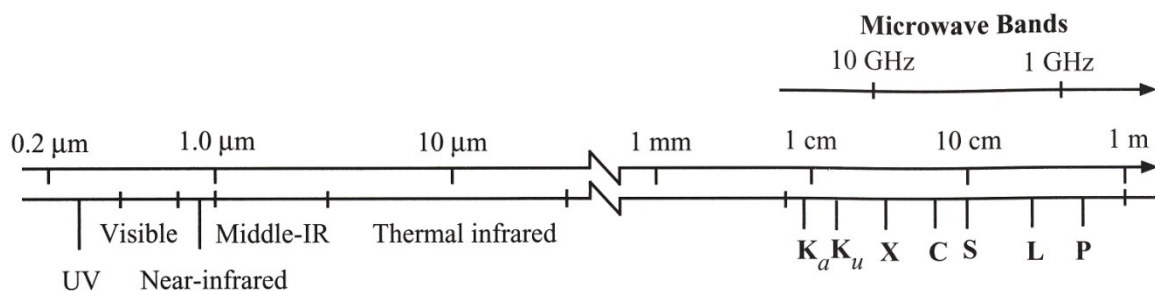


Abb. 28

Es handelt sich hierbei um ein aktives Verfahren, das heißt es werden vom Aufnahmegerät zunächst selbst elektromagnetische Strahlen, bei Radar im Mikrowellenbereich von 1 bis 100cm (vergleiche Abbildung 28), innerhalb von Mikrosekunden ausgesandt, am Meßobjekt reflektiert und schließlich, die zum Sensor zurückkehrenden reflektierten Strahlen, als sogenannten Backscatter, aufgenommen. Die geläufige Übersetzung von Backscatter als Rückstreuung ist nicht ideal gewählt. Denn gerade die Streuung bewirkt aufgrund der ihr zugrunde liegenden Refraktion, daß nicht alle emittierten Strahlen vom Sensor erfaßt werden. Mikrowellen sind licht- und wetterunabhängig weshalb auch bei bedecktem Himmel, in der Nacht oder durch Rauch gearbeitet werden kann. Die geometrische Auflösung eines Ergebnisbildes ist im SAR-Verfahren gegenüber anderen Methoden der Fernerkundung unabhängig von der Distanz des Sensors zum Objekt. Radar erlaubt auch eine Aufnahme bei einer knapp über der Erdoberfläche liegenden Sensorposition. Außerdem vermögen Mikrowellen im Gegensatz zu optischen Aufnahme-Systemen ins Meßobjekt ein- und wieder auszudringen, was v.a. bei hoher Wellenlänge, z.B. im L-Band, für die Erfassung der Bodenfeuchte wertvoll ist, vergleiche dazu Abbildung 20. Diese Eigenschaften verleihen der Radaraufnahme eine Sonderstellung in der Fernerkundung. Umfangreiche Informationen über die Radartechnik bietet [URL-23].

3.5.1 Grundlagen der Aufnahmetechnik

Schematische Darstellung der Radaraufnahme

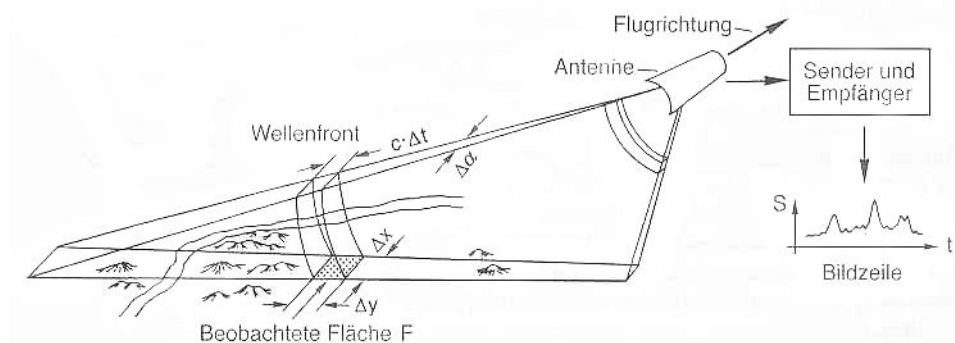


Abb. 29

Obige Darstellung zeigt das Prinzip der Radaraufnahme. An einem Flugzeug ist eine Antenne schräg nach unten montiert. Sie ist so konstruiert, daß sich die in einem Bruchteil einer Sekunde ausgestrahlten Mikrowellen in einen sehr schmalen, aber langen Raumwinkel hinaus quer zur Flugrichtung ausbreiten. [ALB-07] Ca. in der Mitte des gedachten Streifens am Erdboden liegt die zu beobachtende Fläche F . Da diese mit der Vorwärtsbewegung des Flugzeugs über das Gelände wandert, kann die Reflexion von einem schmalen Streifen parallel zur Flugrichtung als Bildzeile aufgezeichnet werden. Eine solche zeilenweise Bildaufnahme eines Geländestreifens neben dem Flugzeug nennt man Seitensicht radar oder Sidelooking Airborne Radar (SLAR), die bei manchen Radartechniken wie z.B. SAR Anwendung findet. Die Fläche F bestimmt die geometrische Auflösung des Ergebnisbildes. Dessen Ausdehnung Δy hängt im wesentlichen von der Dauer des ausgestrahlten Mikrowellenimpulses ab. Die Ausdehnung Δx wiederum wird vom Winkel $\Delta\alpha$ bestimmt, sie wächst mit der Entfernung zur Antenne. Die Abstrahlcharakteristik der Antenne ist eine Funktion ihrer Baulänge und da diese aus praktischen Gründen nicht sehr lang konstruiert werden kann, maximal zwei Meter, ist die Winkelauflösung $\Delta\alpha$ begrenzt. [ALB-07] Systeme dieser Art sind solche mit realer Apertur (RAR), manchmal auch als brute-force-Radar bezeichnet.

Es gibt auch Radarverfahren, bei denen durch lotrechte Aufnahme die Bildzeilen quer zur Flugrichtung erfaßt werden. Ihr Nachteil besteht darin, daß die Strahlungskeule einen kleine-

ren Bereich trifft. Ein weiterer Grund für die Möglichkeit einer seitlichen Aufnahme ist historisch bedingt. Das im Zweiten Weltkrieg weiterentwickelte Radarverfahren diente primär der Beobachtung des Feindes. Flugzeuge konnten ohne in fremdes Hoheitsgebiet eindringen zu müssen, in einem benachbarten Staat spionieren.

Prinzip der seitlichen Radaraufnahme

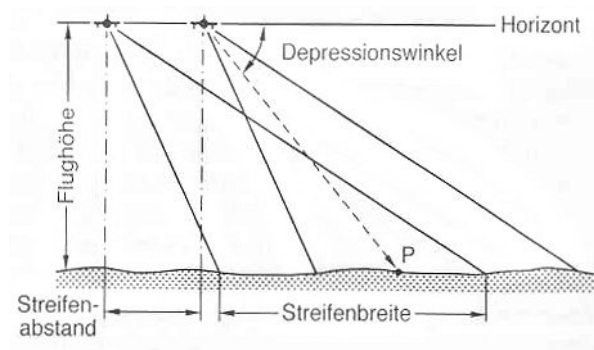


Abb. 30

Der Winkel zwischen der Horizontalen und dem Strahl zum Meßobjekt heißt Depressionswinkel, seine Ergänzung auf 90° heißt Einfallswinkel, vergleiche Abbildung 30. Er hat großen Einfluß auf die Auflösung. Meist nimmt der Rückstreukoeffizient rasch mit zunehmendem Einfallswinkel ab. Da aber die Vegetation eine raue Oberfläche verursacht, trifft dies nicht immer zu, sodaß der Einfallswinkel erheblich von seiner theoretischen Größe abweichen kann.

Um eine SLAR-Aufnahme aus großer Distanz, via Satelliten, durchzuführen, benötigt man Systeme mit synthetischer Apertur, z.B. SAR. Dabei wird nur eine kurze Antenne verwendet, welche die Mikrowellenimpulse in einem breiten Footprint mit dem Öffnungswinkel γ abstrahlt. Die Mikrowellen reflektierenden Objekte werden mehrfach aufgenommen, die Daten können so behandelt werden, als würden sie von einzelnen Elementen eines sehr langen Antennensystems stammen. [ALB-07]

Wellenlängen und Frequenzen wichtiger Mikrowellenkanäle

Spektralkanal	Wellenlänge	Frequenz
Ka-Band	$\lambda \sim 0,7 - 1,0 \text{ cm}$	$f \sim 30 - 40 \text{ GHz}$
X-Band	$\lambda \sim 2,4 - 4,0 \text{ cm}$	$f \sim 7 - 12 \text{ GHz}$
C-Band	$\lambda \sim 4,0 - 7,5 \text{ cm}$	$f \sim 4 - 7 \text{ GHz}$
L-Band	$\lambda \sim 15 - 30 \text{ cm}$	$f \sim 1 - 2 \text{ GHz}$
P-Band	$\lambda \sim 60 - 300 \text{ cm}$	$f \sim 0,2 - 0,5 \text{ GHz}$

Tab. 2

Die Art und Weise wie die Erdoberfläche am Bild wiedergegeben wird, hängt einerseits von Eigenschaften des Aufnahmesystems (Wellenlänge der Strahlung, Polarisation und Depressionswinkel) und andererseits von Eigenschaften der Erdoberfläche (Oberflächenform und -rauigkeit, elektrische Eigenschaften der Objekte) sowie den verwendeten Bändern ab. Gebräuchlich sind die in Tabelle 2 angeführten, wobei die Wechselwirkung zwischen der Strahlung und der Erdoberfläche in den einzelnen Spektralkanälen sehr unterschiedlich ist. [ALB-07]

3.5.2 Die Reflexion von Mikrowellen

Mikrowellenreflexion an Oberflächen verschiedener Rauigkeit

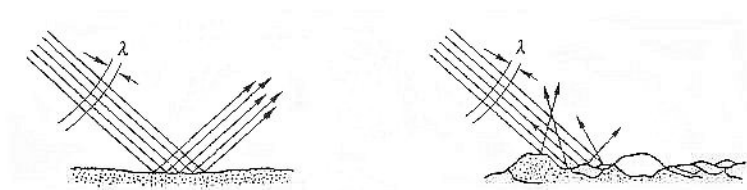


Abb. 31

Bei geringer Oberflächenrauigkeit ist das Radarecho gering, nur wenige Daten werden vom Sensor empfangen, die ausgesandten Strahlen nahezu gespiegelt. Bei großer Rauigkeit reflektieren die Mikrowellen in verschiedenste Richtungen, das vom Sensor empfangene Signal ist diffus, siehe dazu Abbildung 31. Zur leichteren Erkennbarkeit dieser Reflexionsarten sei

auf Abbildung 32 verwiesen. Die Gewässer am linken Bild werden deshalb schwarz wiedergegeben, da der Sensor von ihnen aufgrund spiegelnder Reflexion kein Signal erhielt. Das Gelände am rechten Bild wurde schräg bestrahlt, weshalb dem Sensor zugeneigte Hänge heller, abgewandte dunkel sind.

Auswirkungen der Bodenrauigkeit in Bildern von Mikrowellenaufnahmen



Abb. 32

Die Exposition der Geländefläche zum Radarsystem bestimmt also ihre Helligkeit im aus den Daten abgeleiteten Bild. Ist sie dem System zugewandt wird sie stärker bestrahlt und damit heller im Bild. Ist die Fläche steiler als der Depressionswinkel erfährt sie keine Strahlung, wodurch ein Schlagschatten entsteht und sie schwarz im Bild erscheint. Helle Flecken weisen auf den Rückstrahleffekt hin. Sie geschehen, wenn benachbarte, horizontale oder vertikale Flächen zum Sensor spiegelnd reflektieren, siehe Abbildung 33.

Rückstrahleffekt

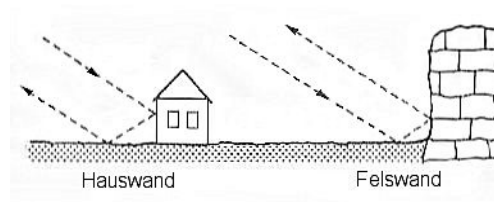


Abb. 33

Für die mittels Radar aufgenommenen, aus Bodenfeuchtedaten ermittelten, Werte für Dürre sind die elektrischen Eigenschaften des Erdbodens wichtig. Metallische und feuchte Objekte reflektieren stark (hohe Dielektrizitätskonstante), weshalb die Mikrowellen kaum in den Boden eindringen, während z.B. trockene Böden nur gering reflektieren (niedrige Dielektrizitätskonstante) und eine große Eindringtiefe haben. Im Gegensatz zu optischen Sensoren besteht beim Radar eine Volumenstreuung, was die Einflußnahme der obersten Bodenschicht auf das Reflexionssignal bedeutet. Die Interaktion zwischen der inhomogenen Schicht und der Strahlung ist stark wellenlängenabhängig. Ab einer bestimmten Menge an Biomasse gilt, je länger die Wellen, desto tiefer das Eindringen der Strahlen und desto größer der Einfluß der Volumenstreuung, siehe Abbildung 34. Dobson et.al. ermittelten 1992 Grenzwerte von rund 200t/ha für den Weihrauch-Kiefer im P-Band, 100t/ha im L-Band und eine sehr geringe Sensitivität des C-Bands für oberirdische Vegetation. [URL-01] Vor diesen Grenzwerten nimmt der Backscatter fast linear mit der Biomasse zu. Landwirtschaftlich bewirtschaftete Flächen weisen, mit einer Biomasse unter 1mg/ha, dennoch einen hohen Genauigkeitsgrad an gemessener Bodenfeuchte auf. Bei einer gewissen Menge an Biomasse sinkt der Wert an ermittelten Bodenfeuchtedaten schnell.

Eindringtiefen verschiedener Radarkanäle

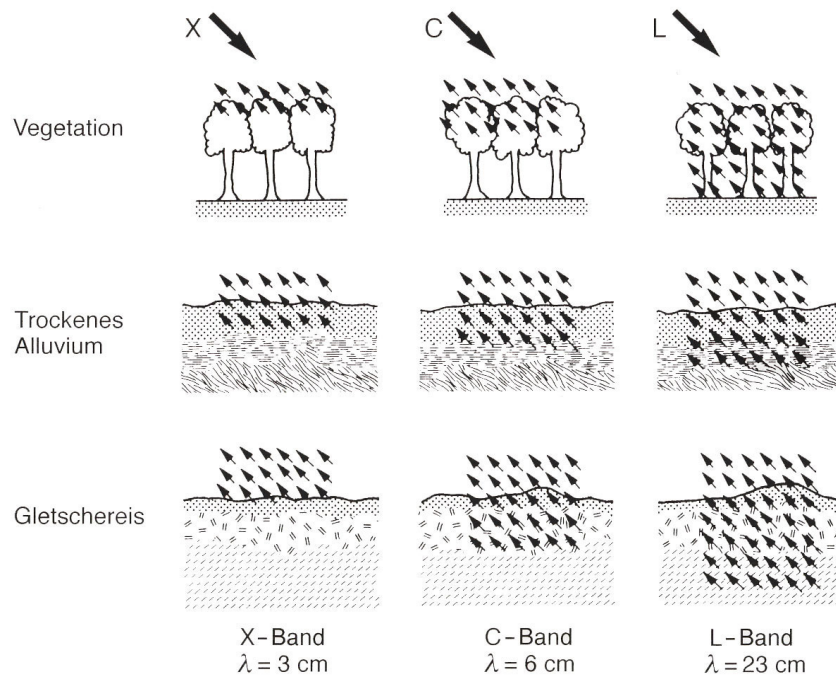


Abb. 34

Wie verschieden ein Bild unterschiedlicher Eindringtiefe ist, zeigt die folgende Abbildung 35 (Raum Solothurn in der Schweiz) in der das jeweils gleiche Gebiet mit dem kurzwelligen X-Band links und dem langwelligen P-Band rechts zu sehen ist. Die im P-Band tief eindringenden Strahlen reflektieren den Erdboden stärker als im X-Band und stellen den Wald somit heller dar. Noch deutlicher tritt der Unterschied bei den Ackerflächen zutage. Sind sie bei X noch deutlich voneinander zu unterscheiden, wirken sie bei P wie eine glatte, einheitliche, dunkle Fläche.

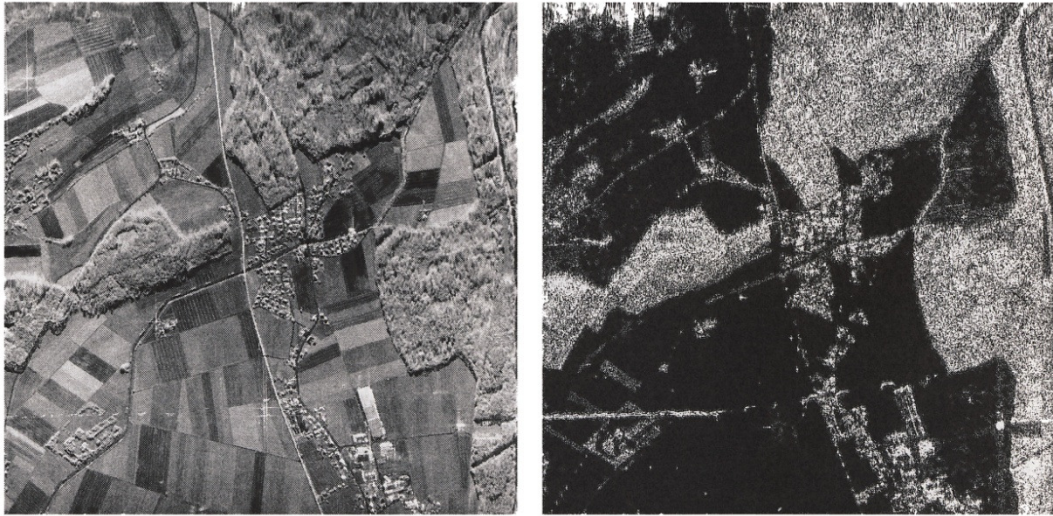


Abb. 35

3.5.3 Polarisation

Zu beachten sind weitere Bildeinflüsse, die eine Aufnahme verändern. Da wäre zum einen die, bereits kurz erwähnte, Polarisation, die bei ausgesandter wie empfangener Strahlung auftritt. Polarisation liegt vor, wenn die elektromagnetischen Wellen eine ausgezeichnete Schwingungsrichtung besitzen. [ALB-07] Man unterscheidet weiters horizontale und vertikale Polarisation, die jeweils mit Hilfe von Filtern, siehe Abbildung 36, erzielt werden können und zu erheblichen Unterschieden in den Aufnahmen führen, vergleiche Abbildung 38. Daß das Aussehen eines Radarbildes auch massiv von der Blickrichtung abhängt, zeigt Abbildung 37.

Lage von vertikal und horizontal polarisierten Wellen

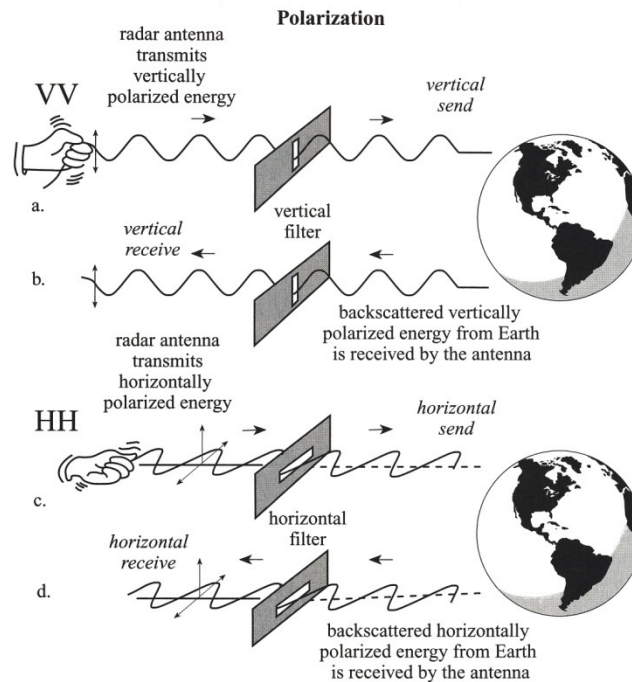
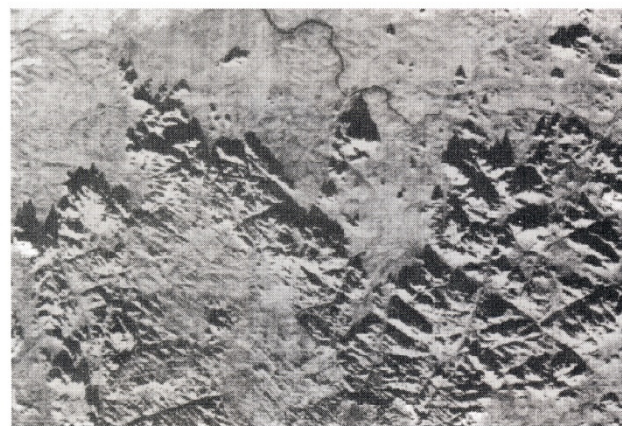


Abb. 36

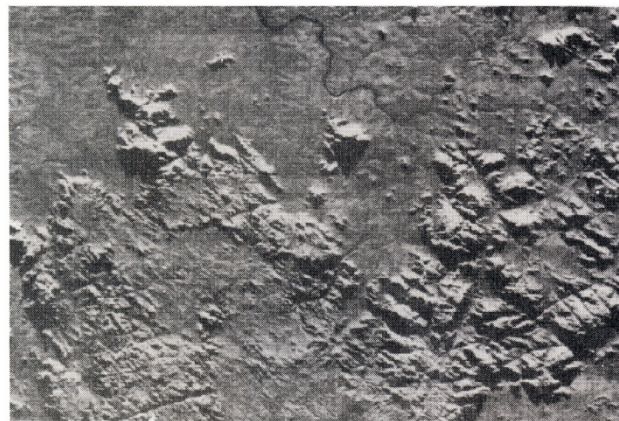
Liegen emittierte und empfangene Mikrowellen auf einer Ebene spricht man von HH (horizontal) oder VV (vertikal) Polarisation. Unterscheidet sich die Ebene, lautet die Polarisation HV oder VH. Man beachte, daß sich eine diffuse Reflexion aus der Erfassung verschiedener, stark unterschiedlich streuender, Objekte zusammensetzt. Ein nackter Boden weist eine niedrigere Streuung als ein dichter Nadelwald auf. Ersterer erreicht ein starkes Signal mit HH oder VV Polarisation, auch Oberflächen-Scattering genannt. Springt hingegen ein Strahl von einer Nadel über einen Ast, über einen Stamm, über den Erdboden zum Sensor wird die Strahlungsenergie depolarisiert und ein Volumen-Scattering ist der Fall. Per Radar kann die Menge des depolarisierten Volumen-Scatterings gemessen werden. Verwendet man diese Aufnahmemethode für dichte Vegetation, muß man den Verlauf der Mikrowellen von der Baum- bis zur Bodenschicht beachten.

Inversionseffekt durch variierende Blickrichtung auf das gleiche Gebiet (Kaduna / Nigeria)
bei einer HH-Polarisation



a. X-band, HH polarization

↑ look direction



b. X-band, HH polarization

↓ look direction

Abb. 37

Ein störender Effekt, der noch erwähnt werden muß, ist unter der Bezeichnung Speckle bekannt. Er verleiht dem Bild eine körnige Struktur. Diese hat ihre physikalische Ursache in Interferenzerscheinungen, ähnlich denjenigen, die bei der Beleuchtung einer Szene mit dem kohärenten Licht eines Lasers entstehen. [ALB-07] Mit geeigneten Filtern, kann man diese Bildeinflüsse beheben.

Auswirkungen verschiedener Polarisierung VV, HH, HV (von links nach rechts) auf das Aussehen eines Gebiets beim Baikalsee

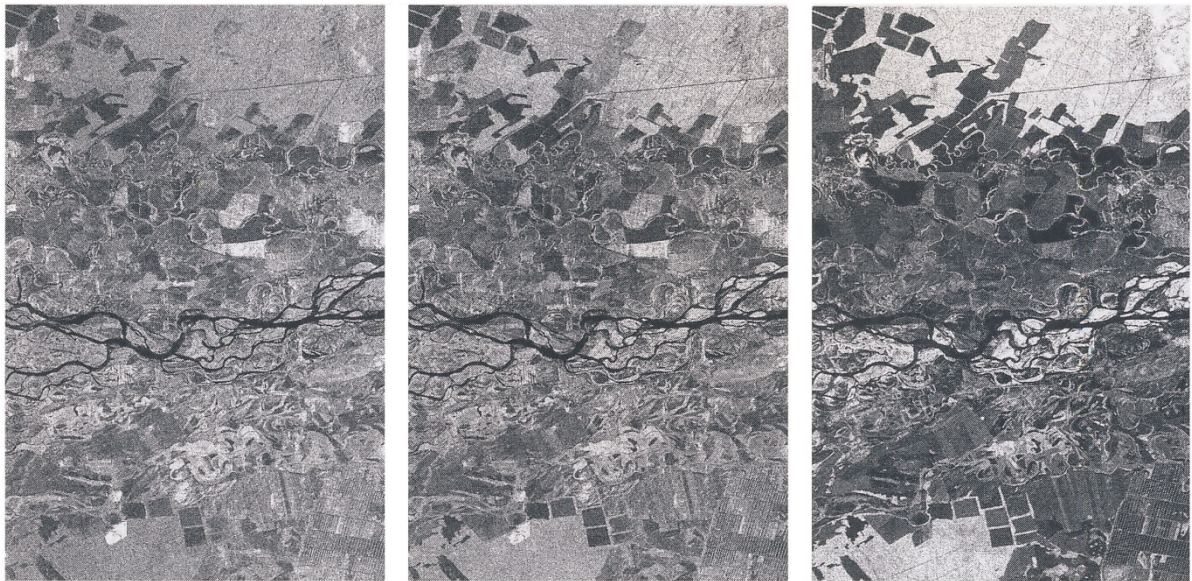


Abb. 38

3.5.4 Objektaussehen im Radarbild

Nicht nur die Lage der Mikrowellen im Raum nimmt Einfluß auf das Aussehen des Ergebnisbildes, sondern auch die sogenannte Laufzeit der Wellenfronten. Eine dem Radarsender/Flugzeug nahe gelegene Strecke wird, ein ebenes Gelände vorausgesetzt, früher reflektiert als eine entferntere und im Bild gestaucht wiedergegeben, was als Near Range bezeichnet wird, siehe Abbildung 39 rechts oben. Dieser Effekt zieht ein verzerrtes Bild nach sich.

Verzerrungen bei der Radaraufnahme

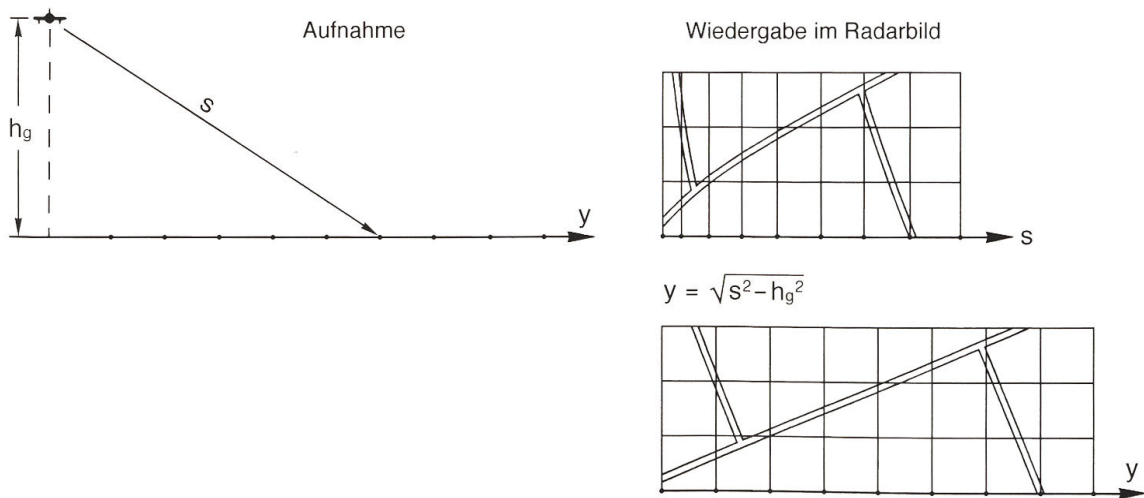


Abb. 39

Diese Verzerrung lässt sich, wie die Skizze zeigt, leicht beheben. Geht dies auch in der Realität bei unebenem Gelände so einfach? Keineswegs, wie die Zeichnung von drei gleich großen, nebeneinander gelegenen Bergen in Abbildung 40 zeigt. Im Gegensatz zu photographischen Systemen, bei denen aufgenommene Objekte mit zunehmender Entfernung radial nach außen versetzt werden, sehen mittels Radar erfasste Objekte gänzlich anderes aus.

Das unterschiedliche Aussehen gleicher Objekte auf dem Radarbild

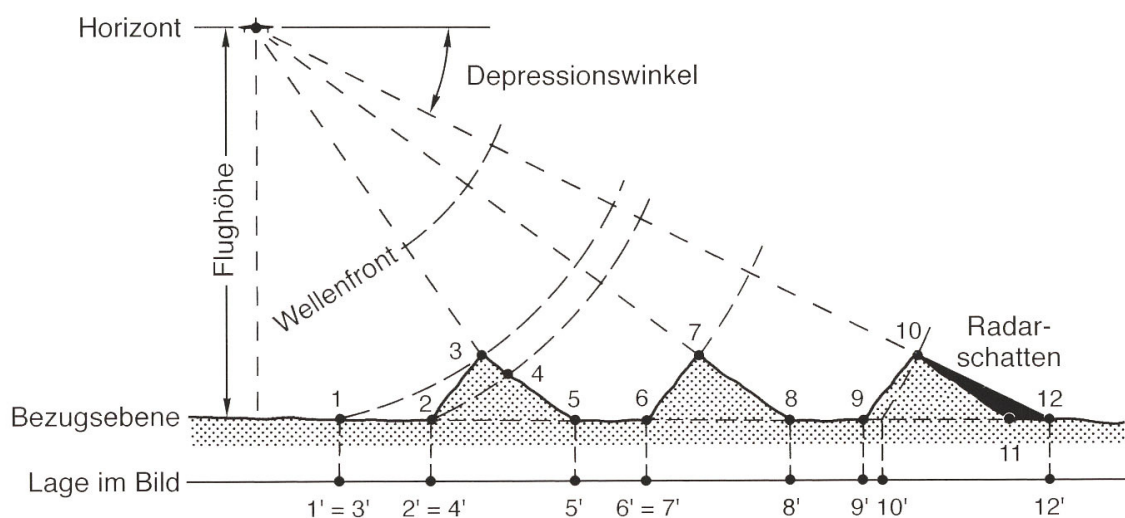


Abb. 40

Man denke sich eine Wellenfront der Mikrowellen die zuerst die Spitze des ersten Berges, also Punkt 3, zeitgleich mit Punkt 1 trifft, weshalb beide im Bild gleich aussehen. Anschließend treffen die Wellen die horizontale Fläche 1-2, den Berghang 2-3 sowie den oberen Teil des abgewandten Hangs 3-4. Alle drei werden gleichzeitig empfangen, wobei sie sich überlagern, was die Interpretation erheblich erschwert. Der zweite Berg sei so positioniert, daß der zum Sensor ausgerichtete Hang 6-7 von der Wellenfront praktisch gleichzeitig getroffen wird, wodurch er im Bild quasi wie ein Punkt aussieht. Der Hang 7-8 liege so, daß er parallel zum von Punkt 7 getroffenen Strahl ist. Im Bild wird er dadurch auf die Strecke 6-8 gedehnt. Der dritte Berg wird zuerst an seinem Fuß in Punkt 9 getroffen. Seine Spitze wird so abgebildet, als käme das Reflexionssignal vom Punkt 10' der Bezugsebene. [ALB-07] Der Hang 9-10 verkürzt sich auf die Ausdehnung 9'-10'. Der dem Sensor abgewandte Hang 10-11 wird wie die Fläche 11-12 gar nicht erst erfaßt und im Bild als Radarschatten informationslos schwarz wiedergegeben.

Eine genauere Skizze des gleichen Prinzips bietet die folgende Abbildung, die zugleich den Grad der Helligkeit eines unterschiedlich geformten Hanges im Radarbild anzeigt.

Unterschiede zwischen realem Aussehen und Radarbild

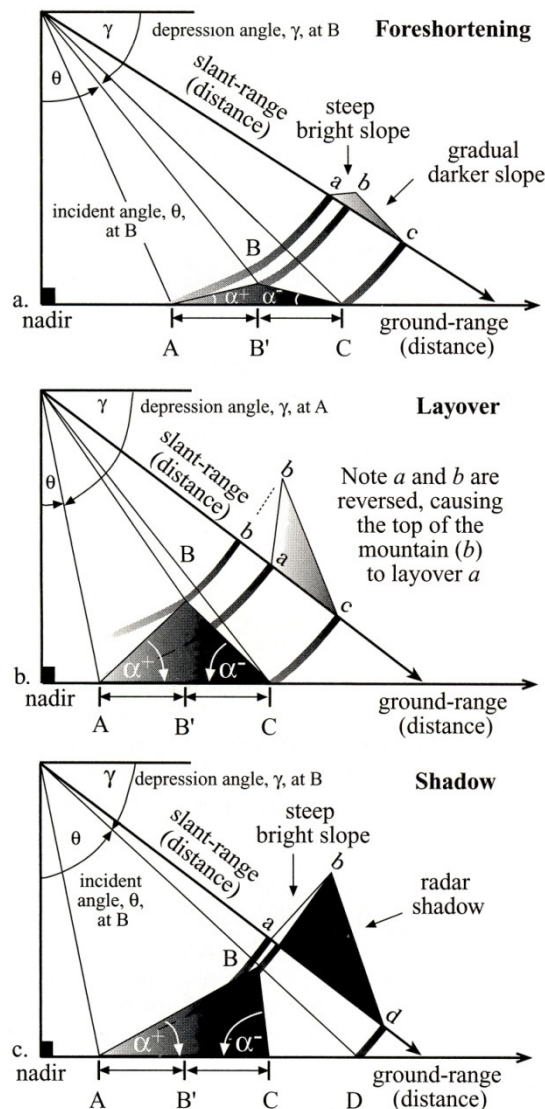


Abb. 41

Zusammengefaßt läßt sich festhalten: Geländepunkte, die in der Bezugsebene liegen, werden grundrißtreu abgebildet. Eine Bergspitze wird um so stärker verkürzt wiedergegeben, je höher sie über dem Gelände liegt. Weiters tritt bei den zum Sensor gerichteten Hängen eine Verkürzung, auch Foreshortening genannt, auf. Dieses ist um so höher, je größer der Depressionswinkel ist und je näher sich ein Objekt im Bereich der Near Range des Footprints befindet. Near Range ist jener Strahl eines erfaßten Objekts, der der Lotrechten am nächsten, Far Range jener, der von ihr am entferntesten ist. Ist der Depressionswinkel größer als die Hangneigung, so geht die Verkürzung in eine Überlagerung, auch Layover genannt, über. [ALB-07] Anders

ausgedrückt: Ein Layover tritt auf, wenn der Einfallswinkel θ kleiner als der Hangwinkel α^+ ist, vergleiche Abbildung 41. Liegt der Depressionswinkel unter dem der Hangneigung, entsteht ein Schlagschatten. Die vom Foreshortening betroffenen Hänge erscheinen im Ergebnisbild heller, da sie ein stärkeres Radarsignal reflektieren. Besonders hell erscheint am Radarbild der dem Sensor zugewandte Hang AB in c der Abbildung 41. Er bildet einen starken Kontrast zum als Radarschatten abgebildeten Hang BC. Ein Radarschatten (Schlagschatten) erfährt abhängig von der Lage seines Objekts im Footprint einen unterschiedlichen Grad an Dunkelheit. Befindet sich das Objekt nahe der Near Range kann der Radarschatten gänzlich hell sein. Aus der Orientierung eines Radarschattens kann im Radarbild auf die Richtung und Lage der Near und Far Range geschlossen werden. Ferner ist der Radarschatten ein Hilfsmittel zur Charakterisierung von geomorphologischen Strukturen. Eine Korrektur der verzerrten Hanggrößen und auftretenden Helligkeitsunterschiede ist ein aufwendiges Unterfangen, speziell für Karten des Gebirges, das große Sorgfalt erfordert.

3.5.5 Entfernungs- und Azimuthauflösung

Um zu erkennen, bis wann zwei oder mehrere Objekte einer Radaraufnahme getrennt erfasst werden, gibt es die Entfernungs- und Azimuthauflösung.

Sind zwei Ziele radial so nah hintereinander, dass deren Echosignale verschmelzen, so kann der Empfänger sie nicht mehr trennen und beide Ziele werden als ein Ziel auf dem Sichtgerät dargestellt. Bei der Entfernungsauflösung handelt es sich um den Grenzfall, bei dem zwei Echosignale gerade noch als zwei Zielechos erkannt und verarbeitet werden. Je kürzer die Wellenlänge, desto höher die Entfernungsauflösung. [URL-23] Sie errechnet sich aus

$$R_r = \tau \cdot c / 2 \cos \gamma$$

wobei τ = Dauer der Strahlenausbreitung und γ = Depressionswinkel.

Gemäß obiger Formel gilt, je größer der Depressionswinkel, desto höher die Entfernungsauflösung. Letztere stellt auch den Grenzwert dar, bis zu dem Objekte getrennt voneinander erkannt werden können. Ist die Distanz zweier Objekte niedriger als die Entfernungsauflösung, überlagern sich ihre Backscatter und erscheinen als ein großes Objekt, vergleiche Abbildung

42. Zweimal zwei gleiche Türme haben einen Abstand von je 30m, wobei das Paar 1 und 2 dem Sensor näher ist und unter einem höheren Depressionswinkel getroffen wird. R_r ist bei den Türmen 3 und 4 niedriger als die Distanz zwischen ihnen, weshalb sie getrennt am Radarbild erkennbar sind.

Entfernungsauflösung unterschiedlicher Depressionswinkel eines RAR

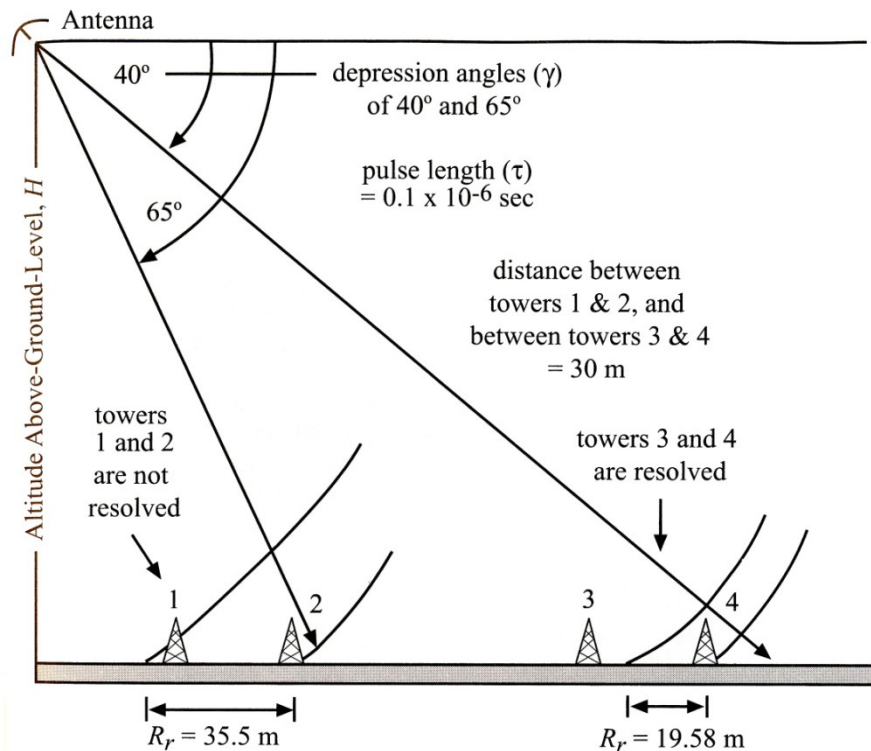


Abb. 42

Die Breite der Strahlungskeule ist direkt proportional zur Wellenlänge der in der Atmosphäre transmittierten Strahlen. [JEN-07] Je größer die Wellenlänge, desto breiter der Footprint. Erfreulicherweise ist auch die Antennenlänge proportional zur Schwadbreite. In RARs gilt, je niedriger die Wellenlänge, desto höher die Azimuthauflösung. Leider nimmt mit einer geringen Wellenlänge auch die Fähigkeit zur Durchdringung von Atmosphäre und Vegetation ab. Die Azimuthauflösung errechnet sich gemäß folgender Formel:

$$R_a = S \cdot \lambda / L$$

Dabei ist S die Länge einer bestimmten Strecke der Realität am Radarbild und L die Antennenlänge. In Abbildung 43 sind zweimal zwei Tanks jeweils 200m voneinander entfernt. Ist ihre Distanz größer als die Azimuthauflösung, können sie getrennt am Radarbild erkannt werden. Man beachte, daß die einheitliche Distanz der Demonstrationsobjekte quer zur Strahlungsrichtung verläuft, während diese in Abbildung 42 mit den Strahlen auf einer Ebene liegen. Wieder liegt das Paar 1 und 2 in der Ebene näher beim Sensor, hat aber eine niedrigere Azimuthauflösung als 3 und 4 bzw. als die Distanz von 200m, weshalb 1 und 2 getrennt erfaßt werden. Sollen sich also Objekte nicht überlagern, müssen Entfernungs- und Azimuthauflösung jeweils niedriger als die Distanz der Objekte sein. Dies gilt bei einer glatten Ebene wie in den Skizzen gezeichnet, die in der Realität aber nie der Fall ist. Die Unebenheiten des Reliefs und jene, die durch Objekte der Vegetation verursacht werden, müssen Berücksichtigung finden.

Azimuthauflösung bei einer Distanz von 20 bzw. 40km zum Sensor

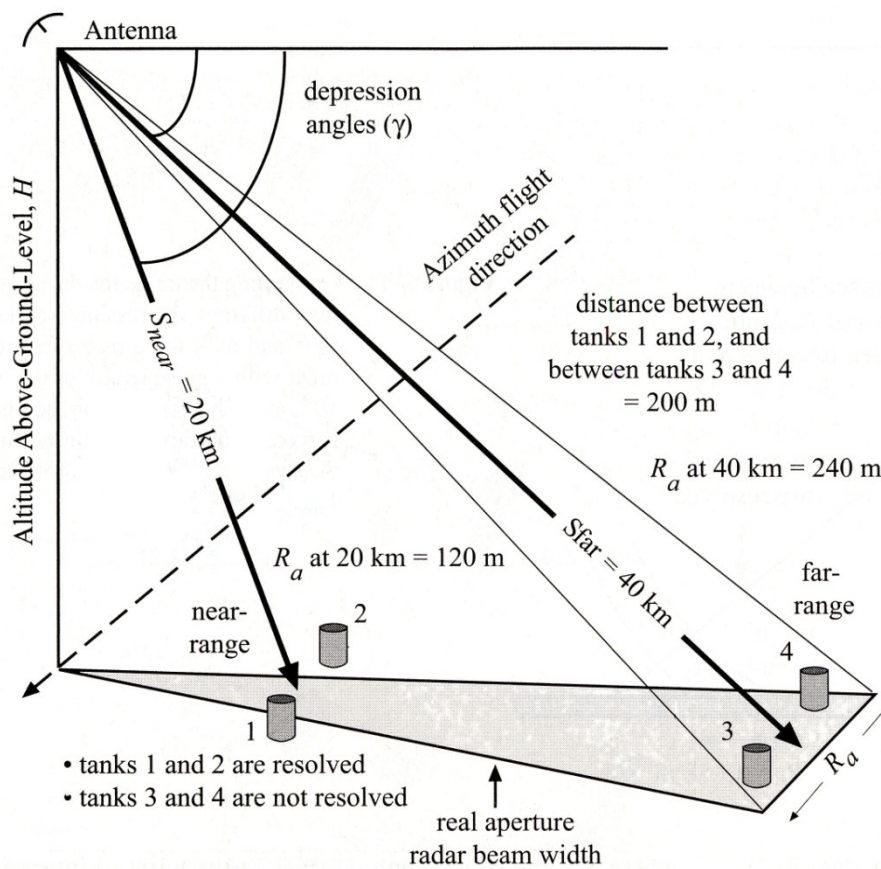


Abb. 43

Man könnte eine sehr lange Antenne bauen um einen niedrigen Wert für R_a , also eine hohe Azimuthauflösung zu erhalten. In der Praxis beschränken aber die technischen Möglichkeiten die Antennenlänge am Rumpf eines Flugzeugs auf maximal 2m. Auf elektronischem Weg kann eine Antenne theoretisch ins Unendliche verlängert werden. Dieses Konzept wird in der SAR-Technik angewandt, die in Kapitel 3.6 näher erklärt wird.

Aufgrund des unebenen Geländes in der Natur variieren Entfernungs- und Azimuthauflösung permanent. Möchte man Messungen über große Gebiete durchführen, sollten beide Auflösungen über entsprechend große Flächen berechnet werden.

Die mit Radarsystemen gewonnenen Daten sind das Ergebnis eines komplizierten Zusammenspiels verschiedener Faktoren. Deshalb überlagern sich in den Daten Signalanteile, die verschiedenartige Informationen vermitteln. Selbst wenn ein bestimmter Informationsgehalt im Prinzip in den Daten enthalten ist, gibt es oft für ihn keinen Zugang, da nur die gesamte Rückstreuung gemessen werden kann. [ALB-07] Abhilfe können die Radarinterferometrie und die Radarpolarimetrie verschaffen.

3.5.6 Radarinterferometrie

Ein Radarbild hat, neben der Unabhängigkeit von Licht und Wetter bei der Aufnahme, einen weiteren Vorteil. Da die bei Radarsystemen verwendete Strahlung kohärent ist, enthalten die gewonnenen Daten nicht nur Informationen über die Intensität der Reflexion, sondern auch Phaseninformationen, die von der Weglänge zwischen Objekt und Sensor abhängen. [ALB-07] Die Signalstärke/Intensität beschreibt das Material der Erdoberfläche, seine Orientierung, Rauigkeit, etc. Anders die Phaseninformation, welche von der Objektentfernung abhängt. Wenn das Radarsystem dasselbe Gelände von einer nahezu gleichen Position erneut aufnimmt, dann sind die Phasenbilder nicht identisch. [ALB-07] Mit mehreren geeigneten Aufnahmen kann aus den aus ihnen gewonnenen geometrischen Informationen ein digitales Geländemodell erstellt werden. Dazu ist es notwendig, aus den vom Satelliten übermittelten Rohdaten, genannt Radarhologramme, mittels aufwendiger Berechnungen Bildinformationen abzuleiten. Die errechneten Bilder sind mit dem menschlichen Auge nicht zu unterscheiden, haben aber unterschiedliche Phaseninformationen, aus denen ein aus farbigen Ringen, sogenannten Fringes, bestehendes Interferogramm gewonnen werden kann, siehe Abbil-

dung 44. Daraus ermittelt man Weglängendifferenzen, aus denen schließlich Geländehöhen berechnet werden können.

Verarbeitung der Phaseninformation

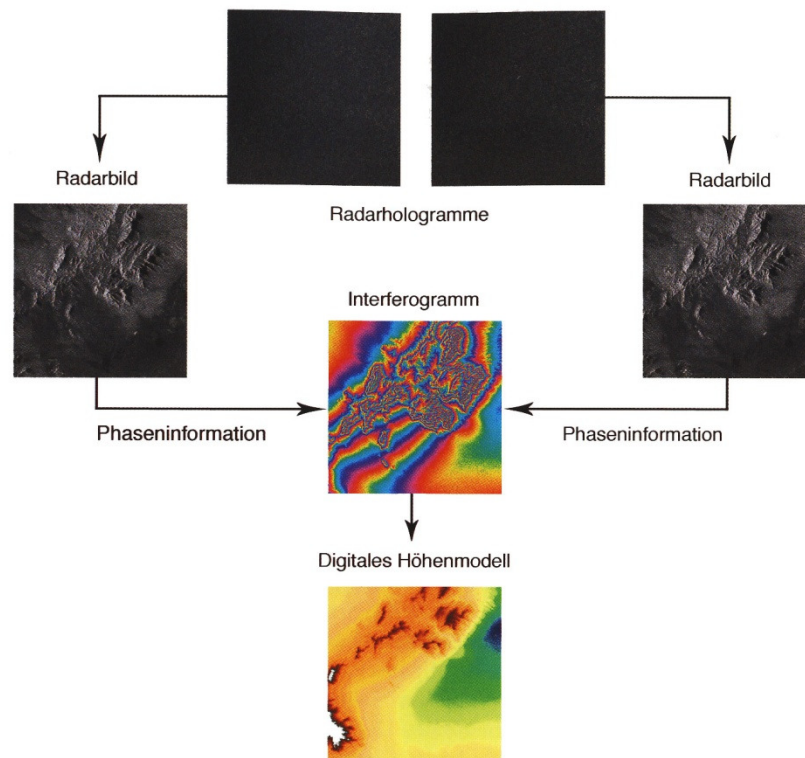


Abb. 44

Die Radarpolarimetrie, ein noch am Beginn seiner Entwicklung stehendes Verfahren der Radarfernerkundung, macht sich die unterschiedliche Depolarisation bei der Reflexion von Mikrowellen an Objekten zunutze. Die Rückstreusignale können in drei Komponenten aufgespalten werden. Daraus lassen sich z.B. Baumbestände in ihrer räumlichen Struktur erfassen. [ALB-07] (Weitere Informationen über Radarinterferometrie und Radarpolarimetrie finden sich auf der Homepage des Instituts für Hochfrequenztechnik und Radarsysteme des Deutschen Luft- und Raumfahrtzentrums (DLR).) [URL-24]

3.6 Synthetic Aperture Radar

Bei diesem Radarverfahren wird die Radarantenne künstlich verlängert, da sie, um eine ähnlich hohe geometrische Auflösung wie bei optischen Systemen zu erreichen, unrealistisch lang sein müßte. Die Antenne selbst ist wie bei RAR selten größer als zwei Meter und sendet, ebenfalls lotrecht zum Flugzeug bezogen, eine relative breite Keule aus, allerdings mit einer größeren Zahl an Strahlen. Beim SAR-Prinzip wird unter Ausnutzung der Satellitenbewegung die effektive Antennengröße und durch Speichern der Radardaten über eine gewisse Strecke und anschließender geeigneter Verarbeitung synthetisch vergrößert, wodurch sich eine ähnliche Auflösung wie bei optischen Instrumenten erreichen läßt. [URL-07] Durch SAR können Radarbilder hoher räumlicher Auflösung, üblicherweise für Flächen von hundert mal hundert Quadratkilometer, gewonnen werden. Ein Nachteil besteht allerdings darin, daß dies nur für kleine Gebiete für kurze Zeit je Umlauf, aufgrund Leistungsbegrenzung, durchgeführt werden kann. Beim Environmental Satellite (ENVISAT) z.B. ist SAR nur zu 30 Prozent der Umlaufzeit einsetzbar.

Das grundlegende Ergebnis eines SAR ist die Höhenmessung der erfaßten Oberfläche. Dies gilt für Gewässer im gleichen Maße wie für das Festland. In der Folge ist das Relief der Meeresoberfläche und daraus abgeleitet das Relief des Meeresbodens eruierbar. Im Gegensatz zu optischen Systemen ist die geometrische Auflösung unabhängig von der Flughöhe. Die Azimuthauflösung ist höher als bei Aufnahmen mit realer Apertur. Radarbilder werden bei SAR aus entwickelten Radarhologrammen mittels kohärenten Lichts gewonnen. Zu beachten ist, daß die Datenverarbeitung aufgrund großer Rechenzeiten lange dauert.

Für Naturkatastrophen ist SAR z.B. bei Tankerunfällen geeignet, da der Ölfilm am Meerwasser glatter ist, als das natürliche Wasser. Auch konnte nachgewiesen werden, daß Extremwellen wie im Zuge eines Tsunami, identifizierbar sind. [BAM-06] Siehe dazu auch die Abbildungen 18 und 19.

3.6.1 Interferometric Synthetic Aperture Radar

Das Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) ist eine Weiterentwicklung in der Radartechnik, die sich die Phaseninformation zunutze macht. Dabei wird ein Objekt von zwei

Sensoren bestimmten horizontalen Abstands angepeilt. Da die beiden Sensoren nebeneinander angeordnet sind, differiert ihre Phaseninformation.

Bei InSAR gibt es zwei Methoden. Bei der Single-Pass-Interferometrie wird das zu messende Gebiet nur einmal überflogen. Der Abstand zwischen den Sensoren liegt lediglich bei ein paar Dezimetern. Diese Variante eignet sich nur für Flugzeuge, da bei einer Höhe von Hunderten Kilometern der Antennenabstand größer sein muß. Dies war bei der Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) im Februar 2000 der Fall, wobei zusätzlich zu den Hauptantennen in der Ladebucht des Orbiters am Ende eines 60m lang ausgefahrenen Masten weitere Antennen arbeiteten. Aus den in 230km Höhe im C- und X-Band erfaßten Daten wurde ein globales (zwischen 60° N und 56° S) digitales Höhenmodell gewonnen.

Bei der Repeat-Pass-Interferometrie können Satelliten mit geringfügig unterschiedlicher Umlaufbahn das Meßgebiet nacheinander überfliegen. Erfolgreich wurde dies mittels der ERS 1 und 2 Satelliten umgesetzt, die um 24 Stunden versetzt ein Gebiet im Abstand von 80 bis 300m zueinander erfaßten. Der Nachteil der Repeat-Pass-Interferometrie liegt in den Veränderungen der Atmosphäre und des Bodens zwischen den beiden Aufnahmezeitpunkten.

Man kann sich die Repeat-Pass-Interferometrie aber auch zunutze machen. Bewegungen in der Natur, wie das Fließen von Gletschern aber auch schnellere wie etwa ein Hangrutsch sowie Veränderungen durch vulkanische und tektonische Aktivitäten, wie z.B. Erdbeben, lassen sich damit erfassen.

4. Erfassung von Bodenfeuchtedaten durch das IPF der TU-Wien

Das IPF hat sich in einem Bereich seiner Arbeit über die Mikrowellen-Fernerkundung in den letzten Jahren auf die Erfassung von Bodenfeuchtedaten im Projekt „ERS / MetOp Soil Moisture“ mittels dem auf den ERS Satelliten befindlichen Scatterometer ESCAT sowie dem Advanced Scatterometer (ASCAT) des ersten Meteorological Operational Polar Satellite (MetOp) konzentriert. Die ermittelten Daten finden zahlreiche Abnehmer. So z.B. die Satellite Application Facilities (SAFs) der European Organisation for the Exploitation of Meteoro-

logical Satellites (EUMETSAT) in Darmstadt, das Joint Research Centre (JRC) der Europäischen Kommission, die FAO bzw. United States Department of Agriculture (USDA) und andere, wissenschaftliche Organisationen. Dabei gehen die Interessen der Kunden hinsichtlich räumlicher Auflösung und Ausdehnung, zeitlicher Abtastfrequenz, Aktualität, Produktzyklus, Datenverfügbarkeit, Layertiefe, Genauigkeit und thematischen Inhalts der Bodenfeuchtedaten weit auseinander. [HAS-06] Dank der Konzentration auf die Bodenfeuchte, ermöglicht das IPF eine verbesserte Prognose für Wetter, Ernte und Naturkatastrophen. [URL-35]

Einstweilen ersuchen hauptsächlich die Vertreter des Projekts Numerical Weather Prediction SAF (NWP SAF) um Surface Soil Degree of Saturation (SSDS) Daten in Echtzeit, also solchen des obersten Zentimeters vom Erdboden. EUMETSAT hat zur verbesserten Entwicklung von Produkten meteorologischer Satelliten ein Netzwerk namens SAF gegründet. Ziel ist die Bereitstellung von Daten über Bodenfeuchte, Regen und Schnee in Echtzeit für hydrologische Nutzer in Europa. Gemeinsam mit der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) und dem European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) entwickelt die TU Wien Algorithmen für die Bereitstellung von Bodenfeuchtigkeitsdaten, abgeleitet aus, vom ASCAT aufgenommenen, Daten. [URL-30]

Die von EUMETSAT empfangenen Daten des ASCAT können momentan frühestens in 30 Minuten übermittelt werden, was aber nur gilt, wenn europäischen Daten eine hohe Priorität zugeordnet wird. Standardmäßig dauert der Prozeß zumindest 135 Minuten. Nach Empfang der Daten der Abteilung Command and Data Acquisition (CDA) in Darmstadt, werden sie der Abteilung Product Processing Facility (PPF) übermittelt, wo sie verarbeitet und auf das bestehende Datenmaterial abgestimmt werden, vergleiche Abbildung 45.

Empfangsprozeß von ASCAT-Daten

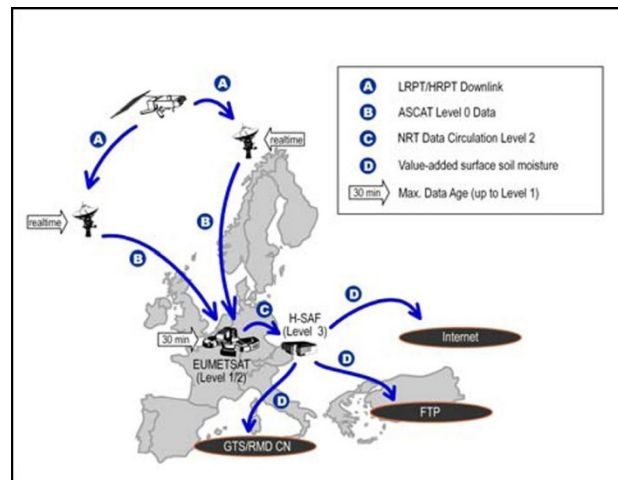


Abb. 45

4.1 ERS 1 und 2

Die beiden ERS Satelliten stammen von der European Space Agency (ESA) und wurden 1991 bzw. 1995 zur multidisziplinären Mikrowellen-Fernerkundung ins All geschossen, um die Erde in 800km Höhe auf einer sonnensynchronen polaren Umlaufbahn, eine Umrundung dauert hundert Minuten, zu beobachten. ERS 1 ist seit 2000 nicht mehr aktiv. [URL-01], Abbildung 46 zeigt ERS 2 im Labor.

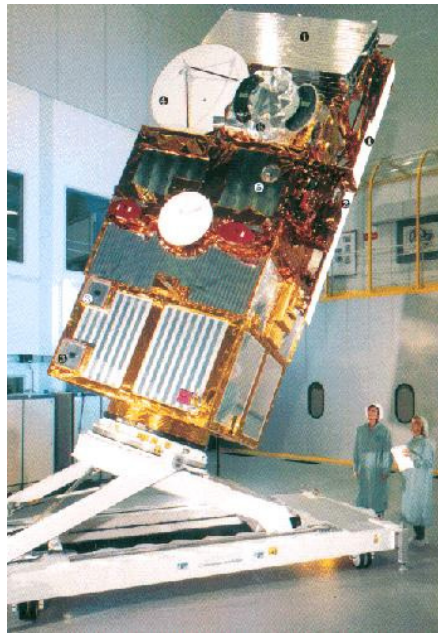


Abb. 46

4.1.1 Scatterometer

Ein Scatterometer, zu Deutsch Streustrahlungsmesser, ist ein nicht abbildendes Radarinstrument zur quantitativen Erfassung des Rückstreukoeffizienten der Geländeoberfläche in Funktion des Einfallswinkels. [URL-01] Der Rückstreukoeffizient σ^0 verändert sich als Funktion der beobachteten Oberflächeneigenschaften, insbesondere der Dielektrizitätsmerkmale, Vegetation und Rauigkeit. [SCI-06] Gegenüber einem SAR ermöglichen Scatterometer einen variablen Blickwinkel, was die Beobachtung von Vegetation verbessert. Dank grober Auflösung ist eine globale Erfassung der Erdoberfläche schon nach drei Tagen möglich. Nach Aussendung von Mikrowellen im Bereich 0,3 bis 300GHz wird die Rückstreuung an Objekten der Erdoberfläche, abhängig von der Distanz zwischen Plattform und Objekt, gemessen. Der Scatterometer ist geeignet, die Oberflächenrauigkeit zu messen, und daraus abgeleitet, die Wellenhöhen des Meeres. Er berücksichtigt ebenfalls die Bedeckung der Erdoberfläche sowie die jahreszeitliche Veränderung der Vegetation. Die an Bord von ERS 1 und 2 befindlichen Scatterometer sind die ersten weltraumgestützten aktiven Systeme dieser Art, welche im C-Band eine globale Abdeckung für einige Jahre ermöglichen. Konstruiert wurden sie zur Ermittlung von Windrichtungen und -stärken. Ihre Sensibilität für Vegetation wie Bodenfeuchte führte zu zwei verschiedenen Forschungszweigen.

4.1.2 Bodenfeuchte-Monitoring im Mikrowellenbereich

Bis vor wenigen Jahren gab es kein überzeugendes Bodenfeuchte-Monitoring. Aus ERS Daten ermittelte Bodenfeuchtwerte waren bis zum Projekt „ERS / MetOp Soil Moisture“ nur sporadisch vorhanden. Zwar existieren präzise Ergebnisse von Messungen, die im Gelände durchgeführt wurden, doch kommen diese für große Flächen teuer und erfordern mühsame Arbeit. Unter den Möglichkeiten, die die Fernerkundung aufzeigt, bieten sich aktive Radar-Systeme im Mikrowellenbereich und Aufnahmen des thermalen Infrarots an. Mikrowellen erlauben qualitativ hochwertige Messungen, bedingt durch ihre hohe Sensibilität für Wasser in der obersten Bodenschicht, bzw. durch die Zunahme der Boden-Dielektrizitätskonstanten korrelierend mit Zunahme an Wassergehalt und sind damit eine direkte Möglichkeit der Beurteilung von Bodenfeuchte. Die Dielektrizitätskonstante gibt an, wie leicht ein Material Strom führt, wobei auch die Geländeform der Erdoberfläche Einfluß nimmt. Trockene Erde erreicht einen Wert von ca. $4\epsilon_r$, feuchte Erde $29\epsilon_r$ und Wasser $80\epsilon_r$. Daher ist der Grad der Feuchtigkeit der bedeutendste Faktor eines Materials hinsichtlich seiner Leitfähigkeit und ebenso ein wichtiger Parameter des Backscatters. Bei einem feuchten Boden dringt ein Mikrowellenstrahl nur wenige Zentimeter ein, wird an der Oberfläche stark gestreut und als starkes, helles Signal den Sensor erreichen. Ein mit Wasser stark gesättigter Wald, verhält sich am Radarbild wie eine über dem Boden schwebende Wolke. Wie viele in situ Beobachtungstechniken erheben Mikrowellen das Verhältnis zwischen Feuchtegehalt und Dielektrizitätskonstanten des Bodens. Je spitzer der Depressionswinkel unter dem sie ausgesandt werden, desto höher die Sensibilität eines Radars für Boden- und Vegetationsfeuchte.

Gerade Aufnahmen im Mikrowellenbereich erfordern die Entwicklung von spezifischen Algorithmen um für einen zu erforschenden Bereich nutzbar zu sein. Dabei erwiesen sich jene für Bodenfeuchte, die aus SAR Daten der ERS Satelliten stammen, nur mit Hilfe von in situ Messungen auf andere Regionen übertragbar. Erfreulicherweise gibt es zahlreiche Studien über durch SAR erhobene Bodenfeuchte, was einerseits einer großen wissenschaftlichen Gemeinde zugute kommt, andererseits für den einzelnen Forscher erschwert, den Überblick zu behalten. Grundsätzlich kommt es vor, daß Algorithmen in der Praxis weniger robust sind als erwartet. Der Schritt von wissenschaftlichen Pilotstudien zu betriebsfähigen Anwendungen wird oft von unvorhergesehenen Schwierigkeiten begleitet. [WAG-06-A]

Für betriebsfähige hydrologische Modelle ist nicht die Bodenfeuchte an sich relevant, sondern auf diese bezogene Variablen wie Wurzelbereich oder Überschwemmungs- und Dürreprognose. [WAG-06-A] Daher werden Bodenfeuchtedaten der Oberfläche stets mit hydrologischen Modellen verknüpft.

Neben dem technischen Fortschritt resultierte erhöhte Nachfrage an Bodenfeuchtedaten in der Genehmigung mehrerer darauf spezialisierter Projekte, z.B. ESAs 2007 gestartete Soil Moisture and Ocean Salinity Mission (SMOS) oder NASAs für 2010 geplantes Hydrosphere State (HYDROS). Beide Vorhaben stützen sich auf passiv arbeitende Radar-Verfahren, aufgrund höherer Eindringtiefe, im L-Band ($\lambda = 15$ bis 30cm). Von diesen Missionen abgesehen, machten Meßdaten des für die Beobachtung von Ozeanen entwickelten ESCATs an Bord der ERS Satelliten die Forscher aufmerksam. Die erste Datenbank einer globalen Erhebung der Bodenfeuchte wurde mittels diesem aktiven Verfahren erreicht und die Gültigkeit der Daten sogleich bestätigt. Dabei wurde ERS zur Ermittlung von Windgeschwindigkeit und -richtung über Meer-/ Ozeanwasser entwickelt, weshalb aus dem Backscatter über dem Festland erst zahlreiche Objekte ausgeschieden werden müssen. Im C-Band aufnehmend, das entspricht einer Wellenlänge λ von ca. $3,8$ bis $7,5\text{cm}$, ermöglichen die drei seitlich abgeschrägten, um je 45° voneinander abgewinkelten Antennen beider Scatterometer der ERS 1 und ERS 2 Satelliten eine globale Erfassung der Bodenfeuchte alle drei bis vier Tage, unabhängig von Bewölkung und Sonnenlicht. Sie sind aufgrund ihrer höheren Wellenlängen den US-Scatterometern überlegen. Obwohl ERS schon 1991 gestartet wurde, schlugen Frison und Mougin erst 1996 vor, den an Bord befindlichen Scatterometer für die Beobachtung der Vegetation zu nutzen, nachdem sie ein vergleichbares Muster zwischen Backscatter und globalen Vegetations-Indizes erkannten. Aus dem Aufnahmematerial geeignete Zahlen der Bodenfeuchte zu ermitteln, erforderte die Entwicklung passender Algorithmen. Auffallend an den Scatterometern ist ein variabler Einfallswinkel, eine schnelle Abtastrate und die exzellente radiometrische Genauigkeit. Die Rückstreuung ist hoch bei großem Einfallswinkel zu trockenem Boden und niedrig bei kleinem Einfallswinkel zu nassem Boden. Dabei nimmt die Sensibilität des Sensors ungefähr exponentiell mit kleinerem Einfallswinkel ab.

Weitere geringfügige Unterschiede weniger Dezibel des Backscatters werden durch die Größe der den Boden bedeckenden Vegetation sowie landwirtschaftlich genutzten Flächen verur-

sacht. Selbstverständlich wirkt sich auch die Jahreszeit in einer Zu- /Abnahme an Biomasse und dadurch variablen Rückstreuung aus. Um das Verhältnis zwischen Backscatter und Bodenfeuchte dennoch aufrecht zu erhalten, sind errechnete Korrekturen erforderlich. Dazu wird in einem Modell die jahreszeitliche Veränderung der Beziehung von Backscatter und Einfallswinkel dargestellt, was typisch trockene wie nasse Bedingungen für eine Rückstreuung simuliert.

Durchschnittlicher globaler SWI für Juni 1992-2000

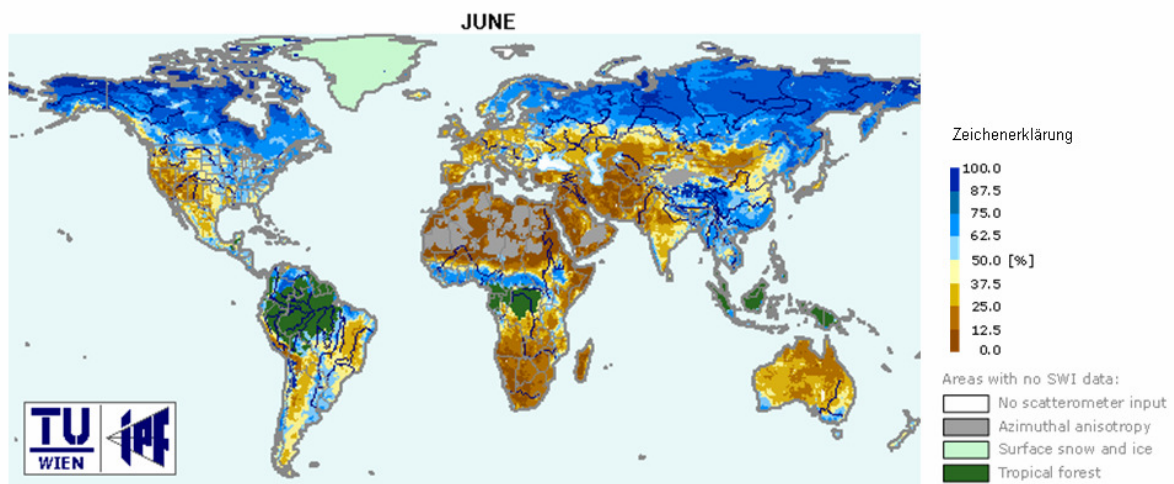


Abb. 47

Derzeit werden mittels ESCAT am IPF zwei Arten von Bodenfeuchte aus den Daten ermittelt. Oberflächen- und Profil-Bodenfeuchte. Erstere, die bereits genannte SSDS, repräsentiert mit einem Wert zwischen 0 und 100 im obersten Zentimeter des Bodens den Grad der Sättigung durch Wasser. Die Profil-Bodenfeuchte, genannt Soil Water Index (SWI), gibt ebenfalls relativ von 0 bis 100 die Sättigung im obersten Meter des Erdbodens an, siehe dazu die Weltkarte in Abbildung 47. Ein niedriger Backscatter kann mit einem Wassergehalt nahe des Permanenten Welkepunkts (PWP) assoziiert werden, während ein hoher Backscatter auf einen gänzlich mit Wasser gesättigten Boden deutet. Der SWI wird mit einer Exponentialfunktion gewonnen und als Indikator für die Erhebung der Wasserverfügbarkeit herangezogen. Da mittels ERS für Bodenfeuchte nur die obersten fünf Zentimeter ermittelt werden können, entwickelten Wagner et.al. am IPF ein Modell für den SWI. Um den Feuchtegrad tieferer Profile zu erhalten muß ein Wasserhaushalts-Modell aus zwei Layern errechnet werden, das den Wasseraus-

tausch zwischen dem oberen, durch Fernerkundung erfaßbaren Layer, und dem darunter liegenden erhebt. Durch einen Exponentialfilter der meßbaren Daten wird die Bodenfeuchte größerer Tiefen geschätzt. Die Bodenfeuchte kann nicht von schneebedeckten Flächen oder dichtem Regenwald durch Scatterometer erfaßt werden. Auch mit Sand bedeckte Wüstengebiete liefern verfälschte Werte. Eine tiefere Messung der Bodenfeuchte als einen Meter ist nur mittels der für die Bestimmung des irdischen Schwerefeldes und zur Beschreibung von Austauschvorgängen zwischen Land, Ozean und Atmosphäre entwickelten Satelliten Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) möglich. Die geometrische Auflösung der durch sie gewonnenen Bilder ist aber mit 500km sehr bescheiden.

Die für die Ermittlung der Bodenfeuchte aus Scatterometer-Daten am IPF entwickelten Algorithmen, wurden, nach einigen regionalen Studien, auf globaler Ebene erfolgreich angewandt. Das Ergebnis war die erste mittels Fernerkundung gewonnene globale Datenbank für Bodenfeuchte des Zeitraums 1992 bis 2000. Seit 2002 wurde sie von über hundert Benutzern weltweit verwendet, was zu einer vermehrten Akzeptanz der Fernerkundung und einer höheren Zahl an wissenschaftlichen Aufsätzen über die Anwendung des Scatterometers für Bodenfeuchte führte. Zahlreiche Studien der ERS Daten verschiedener Wissenschaftler belegen Trends von Niederschlag wie modellierter Bodenfeuchte. Deming Zhao etwa, von der chinesischen Akademie der Wissenschaften, fand durch den mittels ERS errechneten SWI heraus, daß diese Daten die Simulationsgenauigkeit schwerer Regenfälle in Ostasien verbessern.

4.1.3 Weitere Bordinstrumente von ERS

Heute nutzen hunderte Forschungsinstitute weltweit, die von ERS 1 und 2 aufgenommenen Daten. [URL-14] ERS 1 arbeitete bis 2000, ERS 2 besitzt neben den gleichen Bordinstrumenten wie sein Vorgänger das Spektrometer Global Ozone Mapping Experiment (GOME). Da ihre Bahnen nur geringfügig voneinander abwichen, lieferten sie neun Monate lang, bis ERS 1 seine Funktion einstellte, als Innovation interferometrische Daten. [URL-01] Die von beiden zahlreich gelieferten Klimadaten dienten u.a. einer genaueren Wettervorhersage und der Beobachtung des Ozonlochs (durch Messung des Ozongehalts in der Atmosphäre mittels GOME, das auch Spurengase aufspürt). Abbildung 48 zeigt die einzelnen Meßgeräte an ERS 1.

- RA Das Radar Altimeter ist ein passiv arbeitendes Mikrowellensystem, das bei Meeren u.a. Meeresspiegel, Höhe der Wellen, Gezeiten und Daten über Eis ermittelt.
- ATSR Das Along-Track Scanner Radiometer besteht aus einem abbildenden Infrarotradiometer und einem passiven Mikrowellensondierer. Das Radiometer mißt die Temperatur von Meeres- und Landoberflächen (z.B. für das Auffinden von Waldbränden) als auch von Wolkenoberseiten. Der Sondierer mißt den Gesamtwassergehalt der Atmosphäre.
- AMI Das Active Microwave Instrument ist das größte an Bord von ERS, bestehend aus einem SAR und einem Windscatterometer. AMI arbeitet in drei Modi, Abbildungs-, Wellen- (jeweils vom SAR ausgeführt) und Windmodus (vom Windscatterometer ausgeführt). Im Abbildungsmodus liefert AMI wetterunabhängig Bilder auf einem 100km breiten Streifen. Wellen- und Windmodus messen die Windstärke und -richtung an der Ozeanoberfläche sowie Richtung und Form von Ozeanwellen.
- PRARE Das Precise Range and Range Rate Equipment dient der hochpräzisen Bahnbestimmung und für geodätische Anwendungen.
- LRR Das Laser-Retroreflector ist ein im Infrarot arbeitendes Gerät, daß die Höhe des Satelliten bestimmt.

ERS 1 mit seinen wichtigsten Bordinstrumenten

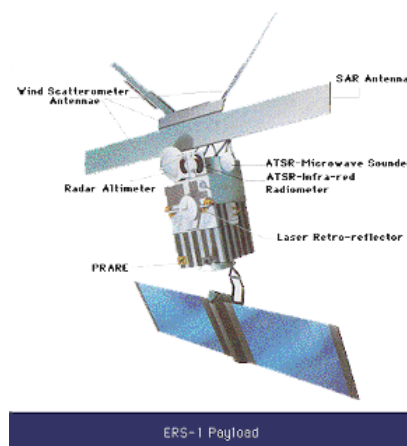


Abb. 48

4.1.4 Anwendungsbeispiel ERS 1 und 2

Die Leistung der beiden Satelliten in der Ermittlung der Bodenfeuchte wurde u.a. mit dem spanischen Duero-Becken, einem Gebiet geringen Niederschlags (400mm pro Jahr), trockenen Sommern und sandigen Böden bei einer jährlichen Durchschnittstemperatur von 12°C, getestet (Abbildung 49). Konkret sollte das den Pflanzen verfügbare Wasser fernerkundlich abgefragt werden. Unterstützt wurde das Vorhaben durch Feldmessungen. Solche erfolgen üblicherweise nur für ein paar Wochen oder Monate während der Vegetationszeit, wenn die Bäume Blätter tragen. Mit Hilfe von REMEDHUS existiert seit Juni 1999 eines von wenigen Projekten, die ganzjährig Daten liefern. REMEDHUS bezeichnet ein Netzwerk von zwei Dutzend Meßstationen auf landwirtschaftlich genutztem Gebiet über einer Fläche von 1.300km² im Duero-Becken. An jeder wird die Bodenfeuchte (θ) mit waagrecht in vier Bodenhorizonte (jeweils 5, 25, 50 und 100cm tief) eingeführten Meßsonden alle 14 Tage ermittelt. Dazu wird Time Domain Reflectometry (TDR) verwendet, welches bestens mit Messungen durch Mikrowellen vergleichbar ist, da es ebenfalls wie der Scatterometer eine elektromagnetische Technik ist und auf die Boden-Dielektrizitätskonstante sensibel reagiert. Mit Hilfe der Meßsonden konnten folgende Werte erhoben werden:

- Rohdichte
- Bodentextur
- Bodenfeuchte bei maximaler Feldkapazität
- Bodenfeuchte bei PWP
- (den Pflanzen) verfügbare Wassermenge
- maximale Wasserkapazität
- und andere

Bei REMEDHUS wurde die Bodentextur als für die Bodenfeuchte wichtigstes Merkmal im Testgebiet angesehen.

Da auf ERS 1 und 2 neben dem ESCAT auch andere Instrumente Einsatz finden und manche nicht gleichzeitig arbeiten können, wurde nicht bei jedem Überflug Dueros ein Bild des Beckens aufgenommen. Gerade über Europa war das SAR häufig aktiviert. Regelmäßige Aufnahmen für die Entwicklung von Modellen wurden von tropischen und trockenen Gebieten

Afrikas erstellt, da in diesen Regionen die saisonale Bodenfeuchte mit Vegetationsmustern korreliert. Wagner et.al. fanden bei Studien der kanadischen Prärie und der iberischen Halbinsel heraus, daß der ERS Scatterometer auf Variabilität der Bodenfeuchte sensibler reagiert als auf Veränderungen der Vegetation.

Physiogeographische Karte der Meßstationen von REMEDHUS im Duero Becken Spaniens

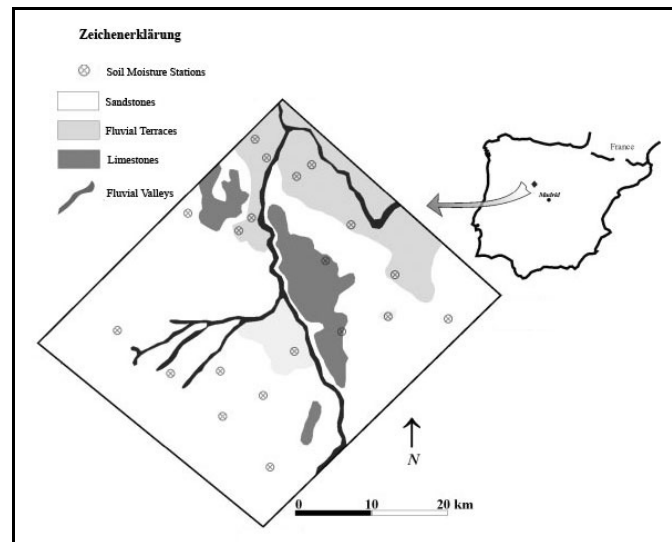


Abb. 49

4.1.5 Datenvergleich mit in situ Messungen

Wie genau sind durch Satelliten erfaßte Daten gegenüber Messungen vor Ort? Ist das Meßergebnis der durch Fernerkundung erhobenen Daten den altbewährten Meßgeräten stets überlegen? Nicht notwendigerweise. Ob auf Flächen umgerechnete in situ Daten genauer sind, ist im Einzelfall zu prüfen, da es zahlreiche Einflußfaktoren gibt.

In Zusammenarbeit mit dem Civil Engineering Programme der Universität von KwaZulu-Natal in Südafrika hat das IPF in einer Studie für Niederschlag, Abfluß und Bodenfeuchte einen Vergleich zwischen den Daten vom hydrologischen Modell TOPKAPI und ESCAT gezogen. TOPKAPI berücksichtigte neben den vertikalen, im Gegensatz zu anderen Modellen auch die lateralen Weiterleitungen an Bodenwasser (horizontaler Untergrundabfluß). [WAG-08]

Die Ergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung v.a. der Hydrographen, aber auch bei den Daten der Bodenfeuchte, konkret des SWI, am Beispiel zweier achtmonatiger Perioden, die einen Regressionskoeffizienten zwischen 0,68 und 0,92 ergaben. Eine solch hohe Ähnlichkeit unabhängiger Zugänge verspricht viel für die Fernerkundung im Allgemeinen sowie den Gebrauch hydrologischer Modelle zur Rückrechnung der satellitenbasierten Bodenfeuchtedaten. [WAG-08] Allerdings bleibt es schwierig, die Gründe für die, zwischen aus in situ Messungen erhobenen und mittels Fernerkundung erfaßten Daten, bestehenden Tendenzen zu identifizieren, da es keine Möglichkeit gibt die „wahre“ Bodenfeuchte zu messen. Allgemein wird anerkannt, daß es Unstimmigkeiten in der Festlegung der zur Ermittlung der Bodenfeuchte einfließenden Parameter gibt. Abbildung 50 zeigt einen SWI Vergleich zwischen bei TOPKAPI erfaßten Daten und dem ESCAT links für November 1993 bis Juni 1994, und rechts um die Jahrtausendwende.

SWI-Werte von TOPKAPI und ESCAT

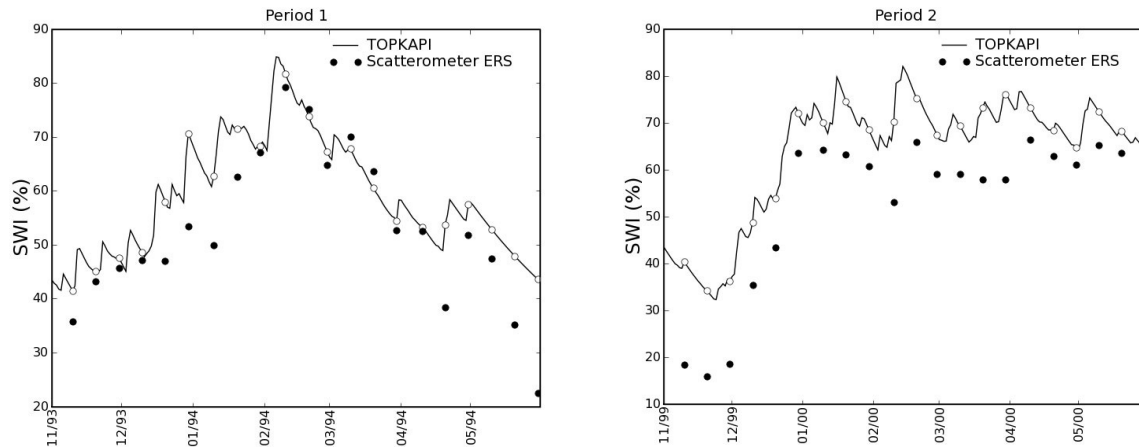


Abb. 50

4.2 MetOp

Bei diesem von ESA und EUMETSAT betriebenen Projekt, das auf eine Kooperation mit der USA zurückgeht, werden drei auf sonnensynchronen Polarbahnen die Erde umkreisende Satelliten genauere Wetterdaten liefern um die globale Erwärmung zu beobachten. Der erste europäische Polarbahn-Satellit, MetOp A, siehe Abbildung 51, startete im Oktober 2006 vom Kosmodrom Baikonur ins All. In 840km Höhe decken seine zehn Instrumente bei unterschiedlicher Schwadbreite nach spätestens fünf Tagen die gesamte Erde ab. [URL-01] MetOp A ist die ideale Ergänzung der geostationären Wettersatelliten wie METEOSAT in 36.000km Höhe und erfasst im Gegensatz zu diesen auch die Pole in hoher räumlicher Auflösung. Die anderen beiden Satelliten MetOp B und MetOp C sollen 2010 bzw. 2015 folgen. Abbildung 52 zeigt wichtige Instrumente von MetOp A.

Attrappe von MetOp A und seine Bestandteile

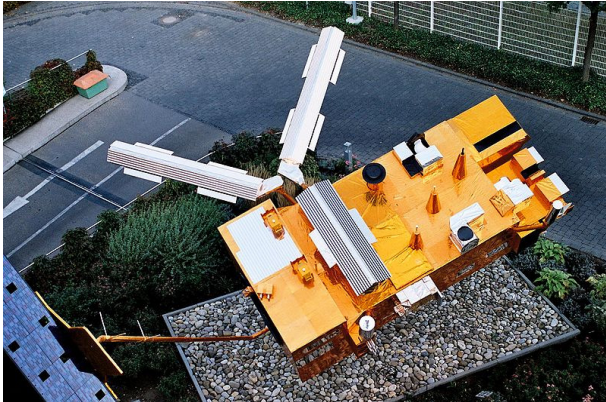


Abb. 51

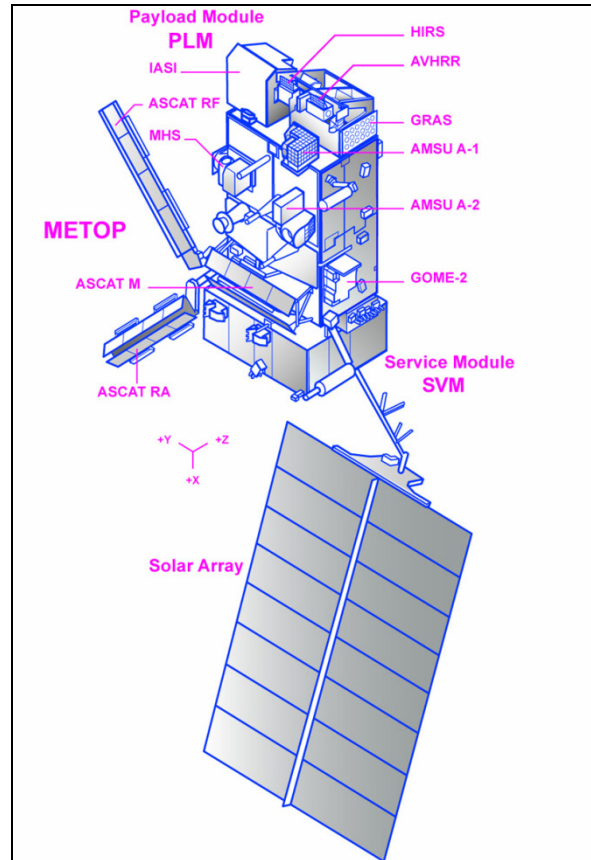


Abb. 52

4.2.1 Advanced Scatterometer

Seine Fortsetzung fand der ERS Scatterometer mit EUMETSATs ASCAT am ersten Satelliten der MetOp Reihe. Der Bau von ASCAT orientierte sich am erfolgreichen Konzept der Scatterometer. Daher verwendet er wie seine Vorgänger im C-Band aufnehmende Fächerstrahl-Antennen, jedoch sechs statt drei, und weist weitere Verbesserungen nach Erfahrungen fast eines Jahrzehnts auf. Die größte ist die höhere zeitliche und räumliche Auflösung. Anfangs wird ASCAT, der mit zwei 550km breiten Schwaden die Erde abtastet, zwar noch Aufnahmen mit 50km Auflösung bieten, später dann aber mit 25km. Auf zwei Seiten sind jeweils eine Antenne lotrecht und je zwei, bei gleichem Einfallswinkel, abgeschrägt angebracht. Damit ist die Aufnahme des Backscatters innerhalb einer Bandbreite verschiedener Einfallswinkel durchführbar, wodurch die Bestimmung des jährlichen Zyklus der Beziehung zwischen Backscatter und Einfallswinkel ermöglicht wird. Dies ist eine essentielle Voraussetzung um jahreszeitliche Effekte der Vegetation zu korrigieren. Bei guter radiometrischer Auflösung

überträgt der ASCAT lineare, frequenzmodulierte Impulse (auch „chirp“ genannt) in einer Dauer von 10ms. Binnen 24 Stunden kann das Gerät 82 Prozent der Erdoberfläche erfassen und die Daten nach ein paar Stunden liefern. V.a. über Europa und tropischen Regionen ermöglicht die hohe Abtastrate schnelleres Erkennen von wichtigen Niederschlagsereignissen. Positiv ist, daß fast alle für ERS Daten entwickelten Algorithmen auch auf ASCAT-Daten anwendbar sind. In den vom IPF der TU Wien ausgewerteten, von ASCAT ermittelten, Bodenfeuchtwerten zeigt sich eine hohe Sensibilität des Meßgeräts für Dürren und intensive Niederschläge. Die folgende Tabelle gibt eine Übersicht zu den vom IPF entwickelten Bodenfeuchte Kennzahlen.

Eigenschaften der von MetOps ASCAT gewonnenen Bodenfeuchte Produkte

Verarbeitungslevel	Level 2	Level 3	Level 3
Name des Datensatzes	SSDS	SWI	getrennte Bodenfeuchte
Definition des Parameters	Bodenfeuchtegehalt in den obersten 5cm des Bodens als relative Einheit zwischen 0 und vollständig gesättigtem Boden	Bodenfeuchtegehalt im obersten Meter des Bodens als relative Einheit vom PWP bis zur Feldkapazität reichend	Bodenfeuchtegehalt in den obersten 5cm des Bodens als relative Einheit zwischen 0 und vollständig gesättigtem Boden
Einheit	%	%	%
Bereich	(0-100)	(0-100)	(0-100)
Räumliche Auflösung	25km	25km	25km (mit qualitativen Layern für ein 1km-Gitter erprobt)
Zeitliche Auflösung	1-2 Tage	ca. 10 Tage	1-2 Tage
Geographische Abdeckung	global	global	Europa
Begrenzungen	keine Daten über dichtem Regenwald,	keine Daten über dichtem Regenwald,	keine Daten über dichtem Regenwald,

	Schnee, Wüsten und Permafrost	Schnee, Wüsten und Permafrost	Schnee, Wüsten und Permafrost
Aktualität	global: 135Min. (EUMETCast) Europa: 30Min. (EARS)	-	global: 135Min. (EUMETCast) Europa: 30Min. (EARS)
Datenformat	BUFR	binär	(BUFR/GRIB)

Tab. 3

BUFR Binary Universal Form for the Representation of meteorological data

EARS EUMETSAT Advanced Retransmission Service

GRIB Gridded Binary

Obwohl das derzeitige Verständnis theoretischer Aspekte der Verminderung von Mikrowellen durch die Vegetation gering ist, zeigten verschiedene experimentelle Studien die signifikante Reflexion vom Erdboden im C-Band, sogar im Fall von mit Vegetation bedeckten Flächen. [WAG-07] Kennt man den jährlichen Vegetationszyklus und seine Einflußnahme in die Beziehung zwischen Backscatter und Einfallswinkel für jeden Punkt der Erde, kann man die durch die Vegetation bedingten Effekte löschen, um die Bodenfeuchte besser erkennen zu können. Das Signal/Rauschen Verhältnis kann mit dem Signal to Noise Ratio (SNR) Index ausgedrückt werden. Es stellt das Verhältnis zwischen dem Informationen beinhaltenden Sensorsignal [URL-01] (hier die Sensibilität für Bodenfeuchte) und dem mittleren Rauschen des Backscatter-Wertes σ^0 , dem durchschnittlichen Radarecho, normalisiert auf einen Einfallswinkel von 40° , dar. Gebiete hohen SNR-Wertes sind für die Abfrage von Bodenfeuchte geeignet (Savanne, Tundra und jede landwirtschaftlich genutzte Fläche). Trotz hoher SNR-Werte muß bei borealem Nadelwald bei der Interpretation große Vorsicht gewaltet werden lassen, da die Bodenfeuchte unter den Einflüssen von Kronendächern, Bodenfrost und -schnee sowie Wassergehalt von Moos als auch Torf Verluste erleidet. In Regenwäldern ist der SNR niedrig, da die Mikrowellen die dichte Vegetation nicht durchdringen und daher eine Aussage über Bodenfeuchte dort nicht möglich ist, vergleiche Abbildung 53. Werte von unter zehn sind für die Abfrage von Bodenfeuchtedaten ungeeignet, solche unter 20 bedürfen großer Sorgfalt. [WAG-07]

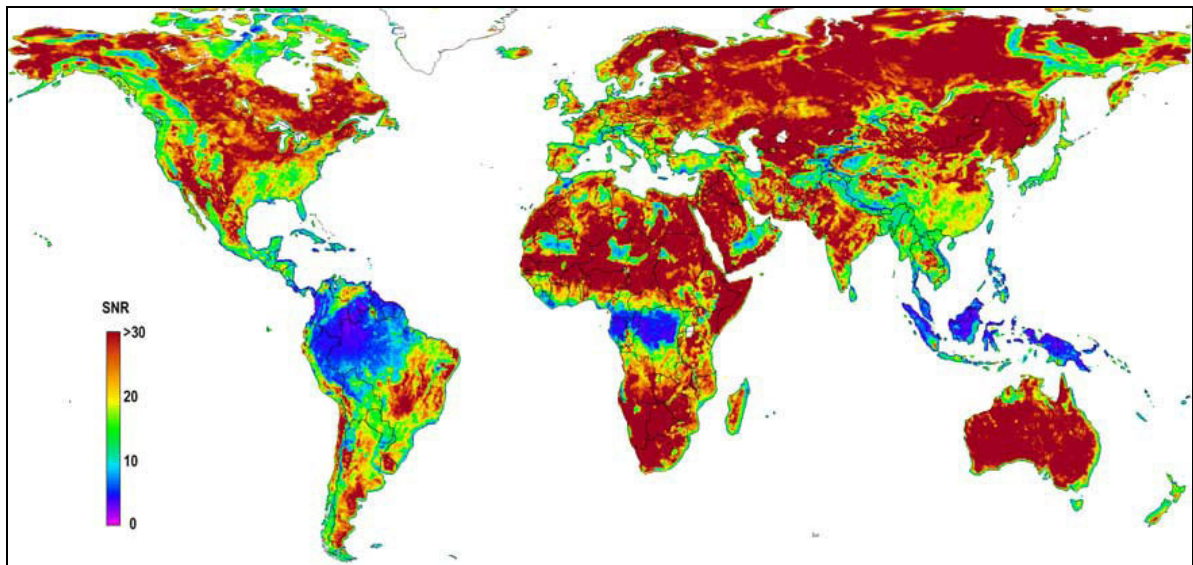


Abb. 53

Zusammenfassend seien in Tabelle 4 einige technische Eigenschaften des ASCATs jenen des Scatterometers gegenübergestellt.

Vergleich ERS' ESCAT mit MetOps ASCAT

Attribute	ERS Scatterometer	MetOp ASCAT
Radar frequency	5,300GHz	5,255GHz
Number of swaths	1	2
Full performance swath width	400km	500km
Reduced performance swath width	500km	550km
Minimum incidence angle	18°	25°
Maximum incidence angle	57°	65°
Nominal spatial resolution	45km	50km
Experimental spatial resolution	None	25km
Interbeam stability	0,46dB	0,46dB
Radiometric resolution at minimum crosswind	8,5 – 9,7 Prozent	3,0 – 9,9 Prozent
Radiometric resolution at	6,5 – 7,0 Prozent	3,0 Prozent

4.3 ScanSAR Systems

Am IPF der TU Wien werden auch Daten aus der SAR-Technik verarbeitet. Im Gegensatz zu konventionellen SAR Systemen ist ScanSAR eine Variante, die eine großflächigere Abdeckung bei kurzer Umlaufzeit kombiniert. Noch aber werden nicht alle Möglichkeiten die ScanSAR für die Messung der Bodenfeuchte bietet, verstanden. Am IPF konzentriert sich die Arbeit auf ENVISATs Advanced Synthetic Aperture Radar (ASAR), einem C-Band Radar-sensor, der im Global Mode sowie Wide Swath Mode aufnehmen kann. Er ist damit hervorragend zur Beobachtung von Bodenfeuchte und Überschwemmungen geeignet, weshalb er an ERS' ESCAT sowie MetOps ASCAT erzielten Leistungen anknüpft. Im Gegensatz zum Scatterometer erreicht er eine hohe geometrische Auflösung von bis zu 30 bis 100m auf Kosten der zeitlichen.

Räumliche und zeitliche Auflösung verschiedener Verfahren für Mikrowellen im Vergleich

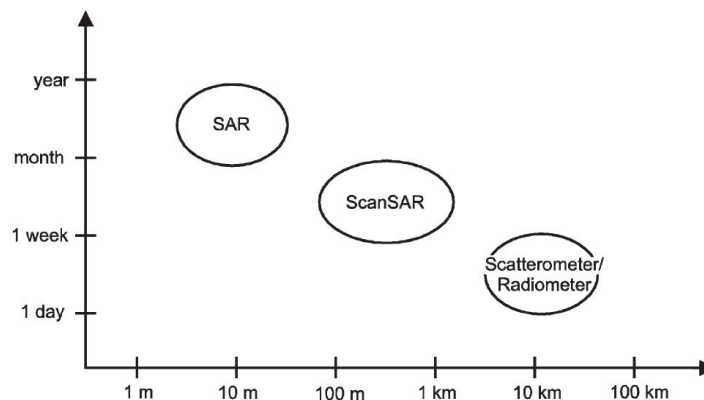


Abb. 54

Wie obige Abbildung zeigt, bieten die vorgestellten Aufnahmeverfahren Daten unterschiedlicher Eigenschaften. Mit Scattero- und Radiometer kann ein großes Gebiet laufend beobachtet werden, wohingegen SAR sehr großmaßstäbige Bilder, allerdings unregelmäßig ermöglicht. Das dazwischen liegende ScanSAR erlaubt ergänzende Informationen.

ENVISAT wurde von der ESA im Februar 2002 in einen sonnensynchronen Orbit rund 800km über der Erde bei einer Inklination von $98,55^\circ$ ins All geschossen. [BAR-06] ASAR besitzt neben einer variablen geometrischen und zeitlichen Auflösung eine variierbare Polarisation im C-Band. Die im folgenden angeführten Beispiele nutzen ASAR Daten im Global Mode, die mit einer Schwadbreite von 405km sowie einer HH-Polarisation im C-Kanal und einer Pixelgröße von 500m aufgenommen wurden, was annähernd der räumlichen Auflösung von 1km entspricht. ASAR Daten sind seit Dezember 2004 verfügbar. Die geringe Speichergröße von 40MB für einen Schwaden, der ganz Afrika abdeckt, erlaubt einen einfachen Zugang.

ASARs Daten werden am IPF für das Okavango Delta und das Projekt Soil Moisture for Hydrometeorologic Applications in the SADC Region (SHARE), beide werden gleich näher erläutert, genutzt. SADC steht für Southern African Development Community. Ein weiteres Anwendungsgebiet ist die Kartenerstellung von Feuchtgebieten und Gewässern der Tundra Sibiriens. Die Vielfalt der Feuchtgebiete verlangt eine hohe zeitliche Auflösung. Jene der diskontinuierlichen Permafrostböden variieren mit den Jahreszeiten. Die zahlreichen Teiche der Tundra sind durch ASAR leicht detektierbar.

4.3.1 Okavango Delta

Dieses Testgebiet liegt im Nordwesten des afrikanischen Staats Botsuana. Es ist ein semi-arides Feuchtgebiet mit einer viermal höheren Evapotranspiration als Niederschlag (460mm pro Jahr). [WOL-08] Abhängig vom regionalen Klima verändern sich die dortigen Feuchtgebiete in Mustern von Jahrzehnten bis Jahrtausenden. Die Dynamik der jährlichen Überschwemmung im Delta, mit Höhepunkt September, hängt nicht nur von internen Faktoren ab, siehe Abbildung 56. Die im Nachbarstaat Angola gelegenen Zuflüsse bestimmen während der Regenzeit wesentlich die Erneuerung des Wassers. Sie wird auch von den Wasserentnahmen in Namibia beeinflusst. Bestehende Verlandungsprozesse verändern das Überschwemmungsmuster.

Zahl der Aufnahmen von ENVISATs ASAR des südlichen Afrika von Dez. 2004 bis Juni 2006

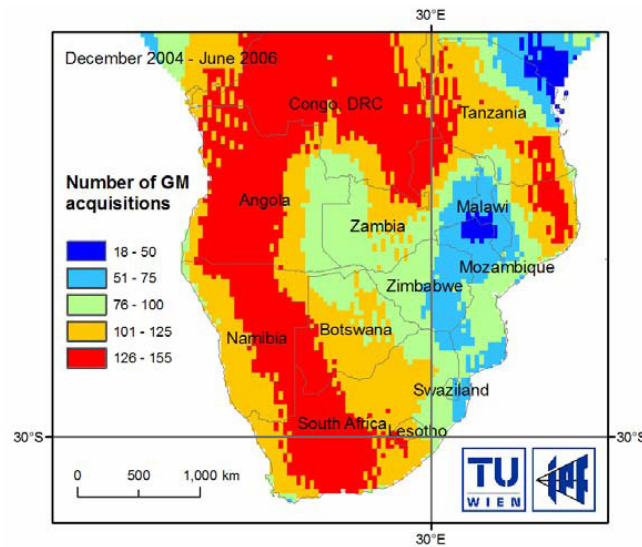


Abb. 55

In der Studie des Okavango Deltas wurden Daten für das Jahr 2005 in monatlichen Schritten untersucht. Aufnahmen dieses Gebiets im südlichen Afrika werden durchschnittlich einmal pro Woche gemacht und variieren in der Praxis sehr stark, vergleiche Abbildung 55. Oft wird Okavango nur am Rand vom Sensor gestreift.

Feuchte Gebiete des Okavango Deltas im April, Mai und September 2005

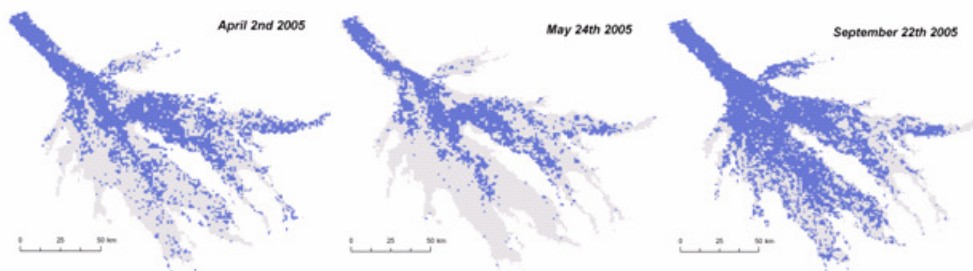


Abb. 56

4.4 Soil Moisture for Hydrometeorologic Applications in the SADC Region

Das im Rahmen der Tiger Projekte der ESA geschaffene SHARE versucht die Lücke an kontinentweiten Bodenfeuchtedaten in Afrika mittels aktuellster satellitenbasierter Radartechnik zu schließen. Es wird versucht, ein betriebsfähiges Bodenfeuchte-Monitoring Service für die SADC zu erstellen. Langfristiges Ziel ist die kostenlose Bereitstellung von Bodenfeuchtedaten zu einer geometrischen Auflösung von 1km im Internet. Bereits erstellt wurden Bilder grober Auflösung sowie ein Scaling Layer. Die hohe Auflösung von 1km ist zwar bereits möglich, allerdings mit schlechter Qualität. Im Global Mode von ASAR kann die Bodenfeuchte der obersten Schicht, unter 5cm Tiefe, gemessen werden. Er ist auch zur Modellierung bzw. Vorhersage von Überschwemmungen gedacht. Nutzer der ermittelten Bodenfeuchtedaten, jene von ASAR sind den in situ Messungen überlegen, sind das South African Weather Service, das derlei Informationen zur Vorhersage von Flutkatastrophen dringend benötigt sowie das South African Agricultural Research Council, welches sich für nachhaltige Verwendung natürlicher Ressourcen sowie die Ernährungssicherheit einsetzt.

Eine vorgesehene Auswertungsmethode setzt jede Backscatter-Messung zu einem Backscatter-Bezugswert in Beziehung. Dieser Bezugswert wird von einer Pixel-spezifischen Backscatter-Zeitreihe erhalten. Anfangs werden die Rauigkeit der Erdoberfläche sowie die Vegetationsbedeckung ausgeklammert. Diese Vereinfachung ist kritisch zu sehen, da alleine die jahreszeitliche Veränderung der Vegetation Messungen beeinflusst. Die Erfahrung zeigt jedoch, daß die Sensibilität des Backscatters im C-Band für Bodenfeuchte weitaus höher als für Vegetation ist. [BAR-06]

4.5 Advanced Microwave Scanning Radiometer-EOS

Ein passiv arbeitendes Gerät zur Ermittlung der Bodenfeuchte ist das Radiometer AMSR-E. Dieser Sensor befindet sich an Bord des NASA-Satelliten Aqua. Er mißt Wetterdaten in der Atmosphäre und in Ozeannähe zur Analyse des sich verändernden Erdklimas. Bei der Erfassung der Bodenfeuchte kann folgendes beobachtet werden. Zwar kann die Aufnahme im C-Band durch die Störung von Radio Frequency Interference (RFI) beeinträchtigt werden, doch die passive Gewinnung liefert, verglichen mit Radar, weniger mit Boden-Rauigkeit vermischte Ergebnisse. Jedoch gibt es noch kein Radiometer, das, an Bord von Satelliten, die

Bodenfeuchte global erfassen könnte. Die dabei entstehenden Probleme sind noch nicht gelöst und können bis heute nicht ordentlich beurteilt werden.

4.6 Interactive Data Language

Das IPF der TU Wien verwendet nicht nur für Daten der Bodenfeuchte die Interactive Data Language (IDL). Es handelt sich um eine von International Telephone & Telegraph Visual Information Solutions (ITT VIS) entwickelte und vom DLR und der NASA genutzte Programmiersprache. Sie erlaubt bessere, spezifisch angepaßte Applikationen als herkömmliche Fernerkundungssoftware. Denn sie ermöglicht das Umsetzen von eigenen Vorstellungen für die verwendeten Fernerkundungsdaten, im Gegensatz zu vorgefertigter Fernerkundungs-Software. Weiters ist sie relativ einfach zu erlernen, verfügt über mächtige Befehle und ist außerdem für Bildverarbeitung gut geeignet.

5. Globale Erwärmung – eine internationale Angelegenheit

5.1 Intergovernmental Panel on Climate Change und World Meteorological Organization

Fernerkundlich erfaßte Informationen stellen für viele verschiedene Organisationen eine wichtige Datengrundlage dar, darunter meteorologische. Die internationale Organisation IPCC, zu deutsch „Zwischenstaatlicher Ausschuß für den Klimawandel“, manchmal auch Weltklimarat genannt, wurde 1988 von der UNEP und der World Meteorological Organization (WMO) mit Sitz in Genf gegründet. Sie faßt weltweite Berichte über Veränderungen von Wetter und Klima verschiedener Wissenschaftsdisziplinen zusammen, um das aktuelle Geschehen in sogenannten Sachstandsberichten alle vier bis sechs Jahre zu publizieren. Im aktuellen, dem vierten, den über 1.250 Wissenschaftler aus 130 Nationen erstellten, geht sie von einer Erhöhung der globalen Durchschnittstemperatur bis 2100, abhängig vom weiteren Anstieg der Treibhausgas-Emissionen, um 1,1 bis 6,4°C aus. Im Original heißt es, daß es sehr wahrscheinlich ist, daß der größte Anteil der beobachteten Erwärmung seit Mitte des zwan-

zigsten Jahrhunderts von der vom Menschen ausgelösten verstärkten Freisetzung von Treibhausgasen verursacht wird. Weiters werden im vierten Sachstandsbericht, derjenige übrigens, der die größte Aufmerksamkeit bisher erlangte, Risiken der globalen Erwärmung beurteilt und Maßnahmen zur Vermeidung diskutiert. Die Hauptaussage hält fest, daß die Katastrophe des derzeitigen Klimawandels durch große Anstrengungen abwendbar ist. Die dafür notwendigen finanziellen Aufwendungen sind geringer als jene Kosten, die durch den Klimawandel verursacht werden.

Die IPCC betreibt selbst keine klimatische Forschung. Kritiker merken an, daß die Regierungen der USA und China, zwei Haupt-Emittenten an Treibhausgasen, Einfluß auf die publizierten Berichte nahmen, indem sie eine Abschwächung der vorgeschlagenen Szenarien durchsetzten und so möglicherweise Forschungsergebnisse falsch dargelegt wurden. Auf jeden Fall gelangen nur Inhalte in einen Sachstandsbericht, die von jedem Staat akzeptiert werden. Oftmals versuchen Delegationen die IPCC-Berichte an ihre Wirtschafts-, Außen- oder Umweltpolitik anzupassen, statt umgekehrt die ökologische Verträglichkeit zum Maßstab ihrer Entscheidungen zu machen. [MÜL-07] Als Resultat verbleiben schwammige Formulierungen, da manche Länder Fakten im Ungewissen halten wollen.

Die WMO ist ein Organ der Vereinten Nationen das schon wesentlich länger als das IPCC existiert. Es ging 1950 aus der 1873 gegründeten International Meteorological Organization (IMO) hervor und hat wie die IPCC seinen Sitz in Genf. Es fördert die Errichtung weltweiter Wetterstationen zur globalen Beobachtung und die Meteorologie im allgemeinen.

5.2 Internationale Charta für Weltraum und Naturkatastrophen

Die am 1. November 2000 in Kraft getretene Charta ist ein internationales Vertragswerk das die Erfassung und kostenlose Bereitstellung von Satellitendaten an die Mitgliedsländer, der nach der Charta benannten Organisation, im Fall von Natur- oder vom Menschen ausgelöste Katastrophen einheitlich regelt. Bekannte Mitglieder sind neben den Gründern ESA und Centre National d'Études Spatiales (CNES) das United States Geological Survey (USGS) und die NOAA. Von Entwicklungsländern sind die indische, chinesische und argentinische Raumfahrtbehörde dabei. Das Katastrophengebiet muß nicht zwingend in einem Mitgliedsland sein. So wurde z.B. der Notfallplan zur Aktivierung der Satelliten auf bedürftiges Gebiet Ende

2003 durchgeführt, als in der Stadt Bam im Iran die Erde bebt. Bereits über 200 Mal konnten Sicherheitsbehörden, Rettungs- und Weltraumorganisationen von der Einrichtung profitieren.

5.3 Zentrum für satellitengestützte Kriseninformation

Das Zentrum für satellitengestützte Kriseninformation (ZKI) ist ein Dienst des dem DLR unterstehenden Deutschen Fernerkundungsdatenzentrums (DFD). Seine Aufgabe ist die schnelle Beschaffung, Aufbereitung, Analyse und Bereitstellung von Satellitendaten bei Natur- und Umweltkatastrophen für humanitäre Hilfsaktivitäten und für die zivile Sicherheit. [URL-01] Die Auswertungen werden gemäß den jeweiligen Bedürfnissen der Bedarfsträger ausgeführt. Der Anstieg globaler Naturkatastrophen führte zu einer erhöhten Nachfrage aktueller, flächenbezogener Information. Das ZKI liefert Geodaten nicht nur während einer Katastrophe, sondern auch für die Wiederaufbauphase danach. Es ist weltweit mit Behörden des Zivilschutzes vernetzt.

5.4 Klimakonferenzen

Die Vereinten Nationen begannen im Zuge ihrer Klimarahmenkonventionen Klimagipfel abzuhalten, die seit 2003 jährlich stattfinden.

5.4.1 Kyōto 1997

Auf der Klimakonferenz Anfang Dezember 1997 im japanischen Kyōto wurde ein Zusatzprotokoll zur Ausgestaltung der United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) beschlossen, das unter der Bezeichnung Kyōto-Protokoll Bekanntheit erlangte und am 16. Februar 2005 in Kraft trat. Oberstes Ziel ist die Limitierung der Treibhausgas-Emissionen, die als Hauptfaktor der globalen Erwärmung festgelegt wurden. Folgende Gase reglementierte man:

- CO₂
- CH₄
- N₂O
- H-FKW (Fluorkohlenwasserstoffe)

- FKW (perfluorierte Kohlenwasserstoffe)
- SF₆

Die Konferenz in Kyōto gab 10.000 Teilnehmern elf Tage lang Zeit, um sich auf eine gemeinsame Klimapolitik zu einigen. Auf ihr partizipierten nicht nur Politiker verschiedenster Länder, sondern auch Vertreter von NGOs (3.900) sowie von Medien (3.700).

Der Anhang B des Protokolls sieht eine globale Reduktion der Treibhausgas-Emissionen zwischen 2008 und 2012 um durchschnittlich 5,2 Prozent gegenüber 1990 vor. Dabei werden den Staaten abhängig von ihrer wirtschaftlichen Entwicklung verschiedene Ziele gesetzt. Die EU-Länder teilten ihr Reduktionsziel nach dem Prinzip der Lastenteilung auf. Während Deutschland um 21 Prozent weniger Treibhausgase emittieren muß, wird Spanien eine maximale Zunahme um 15 Prozent gewährt. Im Durchschnitt ist EU-weit eine Verminderung von acht Prozent vorgesehen. Osteuropäische Staaten müssen ihr Emissionsniveau halten oder leicht senken, z.B. Rumänien um acht Prozent. Da Wohlstand mit Treibhausgas-Emissionen einhergeht, wurden prosperierenden Entwicklungsstaaten wie China, Indien oder Brasilien keine Ziele auferlegt. Vereinbart wurde weiters, daß das Protokoll erst in Kraft tritt, wenn 55 Staaten, die zusammen 55 Prozent der CO₂-Emissionen von 1990 verursachten, es ratifizieren. Nachdem durch die Rücknahme der Unterschrift von George W. Bush 2001 die USA aus dem Abkommen ausstieg, konnte das Kyōto-Protokoll erst mit der Ratifizierung Rußlands am 5. November 2004 90 Tage später in Kraft treten. Schon zuvor hatte die EU mit Kanada und Japan zugesagt, auch ohne formelles Inkrafttreten des Protokolls, bis 2012 ihre Reduktionsziele anzustreben.

Schon vor Kyōto ließen die Vereinigten Staaten die Mitwelt spüren, daß ihnen ihre Wirtschaft wichtiger ist als der Klimaschutz. Denn im Juni 1997 wurde die Byrd-Hagel-Resolution im Senat mit 95:0 Stimmen angenommen, in der die USA ein international verbindliches Klimaschutzabkommen verweigern, solange nicht auch Entwicklungsländer zu Emissionsreduktionen verpflichtet würden, oder wenn der US-Wirtschaft ein schwerwiegender Schaden drohe. [URL-13]

Rußland genehmigte das Kyōto-Protokoll erst, als die unklar gebliebene Regelung zum Emissionsrechtehandel und die Anrechnung von Senken (z.B. Wäldern) zu seinen Gunsten stan-

den. Da im Bezugsjahr 1990 noch viele umweltverschmutzende Fabriken ihren Dienst taten um bald darauf aus Gründen der Rentabilität stillgelegt zu werden, versprach das Kyōto-Protokoll ein lukratives Geschäft für Rußland zu werden.

Nach zehn Jahren sind die meisten Staaten weit von ihrem Ziel entfernt, obwohl die endgültige Fassung von 2001 ökonomische Mechanismen zur leichteren Zielerreichung erlaubt, also z.B. den Handel mit Emissionszertifikaten. Kritiker bemängeln, dadurch sei eine Einschränkung des Klimaschutzes gegeben. Österreich legte in der Emission von CO₂ 2004 15,7 Prozent gegenüber 1990 zu, statt 13,0 Prozent ab. Nur v.a. Staaten des ehemaligen Ostblocks, die zu keiner Reduktion verpflichtet wurden, emittieren heute weniger als 1997, z.B. Rußland um -32 Prozent. [URL-10] Dazu muß jedoch gesagt werden, daß dort eine radikale Trendumkehr vorliegt. Sank der Ausstoß an Treibhausgasen zwischen 1990 und 2000 noch um 39,3 Prozent, gab es danach keine der stark verschmutzenden Industrieanlagen aus Zeiten des Kommunismus mehr zu schließen. Von 2000 bis 2004 stiegen die Treibhausgas-Emissionen um 4,1 Prozent. Global betrachtet ist der gleiche Effekt gedämpfter zu beobachten.

5.5 Notwendige Veränderungen

5.5.1 Siedlung und Bebauung

Der entstehende Schaden durch Naturkatastrophen ist, ausgedrückt in Geld, an vom Menschen Geschaffenem am größten. Wider warnendes Wissen, werden nach wie vor Gebäude in gefährdeten Gebieten oder in Zonen in denen die Umwelt geschädigt wird errichtet. Anfällig sind besonders Gebiete in Regionen häufiger Naturkatastrophen, z.B. Küstenstädte. Im Jahr 1930 lebten in allen 109 US-Counties an Golf- und Atlantikküste von Texas bis Virginia weniger Menschen als heute allein in Miami wohnen. [URL-07] Hurrikan Katrina verursachte im August 2005 in den USA den Tod von 268 Menschen und Schaden in Höhe von 62 Mrd. Dollar. Ein Baustopp in Küstengebieten müßte durchgesetzt werden, widerspricht aber dem Immobilienmarkt der als wichtiger angesehen wird. In den Entwicklungsstaaten sind die Einwohner häufig gezwungen in gefährdete Gebiete hoher Vulnerabilität, wie die an Küsten gelegenen Megastädte Rio de Janeiro, Mumbai oder Djakarta, zu migrieren um überleben zu können. Der rapide Zustrom überfordert zudem die Behörden bei der Kontrolle zur Einhaltung von Bauvorschriften.

5.5.2 Effiziente Energienutzung

Erneuerbare Energieträger müssen gegenüber den endlichen forciert werden. Nicht nur deshalb, weil etwa das Erdölfördermaximum in diesen Jahren überschritten wird, sondern um die Emissionen der Treibhausgase einzudämmen. Man muß sich bewußt sein, daß selbst ein sofortiger Stop der Emissionen aller das Klima beeinflussender Gase ein Anhalten des Anstiegs der Erdtemperatur frühestens in einigen Jahrzehnten bewirkte, da die bereits in der Atmosphäre befindlichen Kohlendioxid-, Methan- etc. Moleküle erst abgebaut werden müssen. Vielleicht kann der früher oder später deutlich steigende Ölpreis einen Anreiz liefern umzusteigen. Manche Staaten denken heute darüber nach, wobei eine Tendenz zur Atomkraft gegeben ist, da der Strombedarf im Steigen begriffen ist. Noch hinkt die Leistung der erneuerbaren Energieträger hinterher, allerdings mit hohen regionalen und zeitlichen Unterschieden. Windräder an exponierten Hügeln mit regelmäßigen Stürmen arbeiten um ein vielfaches effektiver als z.B. auf einer Ebene mit Flaute. Steigende Temperaturen werden in einigen Gegenden zu mehr Sonnentagen und einem Leistungswachstum von Photovoltaik-Anlagen wie Sonnenkollektoren führen.

Der Einsatz solcher regenerativer Energien verlangt natürlich eine entsprechende Infrastruktur und Nachfrage. Obwohl letztere in den reichen Industriestaaten deutlich vorhanden ist, prognostiziert das Wiener Internationale Institut für Angewandte Systemanalyse (IIASA) für 2020 für die Entwicklungsländer einen dreimal so hohen Einsatz der erneuerbaren Energien, nämlich 760Mtoe. Das Mißverhältnis ist um so krasser, als der Umstieg auf regenerative Energien im Norden wesentlich leichter zu bewerkstelligen wäre als im Süden. [LeM-07] Die Industrienationen müssen sich endlich dazu durchringen, ihre Potentiale an erneuerbaren Energieträgern zu nützen. Gleichzeitig sollen sie den Süden, reicher an Biomasse, Wasserkraft und Solarthermie, unterstützen entsprechende Forschung und Entwicklung zu betreiben.

Der Umstieg der Energieträger bringt wenig, wenn nicht sparsam mit Energie umgegangen wird. Die nach ihr wachsende Nachfrage braucht auch Kontrolle.

5.5.3 Sinnvolle Bodenbewirtschaftung

Die ökologische Landwirtschaft erweist sich vielfältig als vorteilhaft. Zu nennen ist die höhere Bindung von CO₂, ein höherer Humusgehalt und eine größere Wasserspeicherfähigkeit gegenüber konventionell bewirtschafteten Böden. Zwar steigt mit der Temperatur auch die Fruchtbarkeit, sodaß nördliche Staaten das anbauen können, was im Süden durch Dürre verloren geht, aber eine ausreichende Ernährung aller Erdenbürger scheitert, wie es schon lange der Fall ist, dennoch an der Verteilungsfrage von Reich zu Arm. Höhere meteorologische Schwankungen beeinträchtigen das Pflanzenwachstum insgesamt. Ein Grund mehr für stabilere Böden durch ökologischen Anbau.

Schlußwort

Die globale Erwärmung ist ein alle Völker betreffendes Problem mit zunehmender Bedeutung. Die Fernerkundung stellt ein wertvolles Instrument zur Beobachtung von Änderungen des Klimas sowie für Naturkatastrophen dar. Jene der Dürre kann nur indirekt gemessen werden. Günstig erweist sich hierbei die Bodenfeuchte, welche am IPF der TU Wien in Projekten wie „ERS / MetOp Soil Moisture“ ausführlich erforscht wird. Vereinbarungen wie die Internationale Charta für Weltraum und Naturkatastrophen stellen sicher, daß im Notfall auch Staaten ohne eigene Satelliten rechtzeitig gewarnt werden, so dies möglich ist und im Schadensfall technisch durch Bereitstellung von Karten geholfen wird. Die klimatischen Änderungen der Jahrtausendwende sowie zukünftige stellen nicht nur für Meteorologen sondern auch für Wissenschaftler der Fernerkundung eine große Herausforderung dar.

Anhang

Quellen

Bücher

- [ALB-07] Albertz Jörg / Einführung in die Fernerkundung, 2007, Wissenschaftliche Buchgesellschaft Darmstadt
- [ANS-07] Anschöber Rudolf, Ramsauer Petra / Die Klima-Revolution, 2007, Deuticke im Zsolnay Verlag, Wien
- [BÉG-02] Bégni Gérard / Observing our environment from space – New solutions for a new millennium, 2002, Swets & Zeitlinger B.V., Lisse
- [CUB-00] Cubasch Ulrich, Kasang Dieter / Anthropogener Klimawandel, 2000, Klett-Perthes, Gotha
- [DOW-07] Dow Kirstin, Downing Thomas E. / Weltatlas des Klimawandels, 2007, Europäische Verlagsanstalt, Hamburg
- [ERA-05] Erasmi Stefan et.al. / Remote sensing & GIS for environmental studies, 2005, Goltze, Göttingen
- [JEN-07] Jensen John R. et.al. / Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective, 2007, Pearson Education Inc., Upper Saddle River
- [LeM-07] Le Monde Diplomatique / Atlas der Globalisierung, 2007, Taz, Berlin
- [LeM-08] Le Monde Diplomatique / Atlas der Globalisierung spezial: Klima, 2008, Taz, Berlin
- [LYN-04] Lynas Mark / Sturmwarnung – Berichte von den Brennpunkten der globalen Klimakatastrophe, 2004, Riemann, München
- [MEN-90] Mensching Horst G. / Desertifikation – Ein weltweites Problem der ökologischen Verwüstung in den Trockengebieten der Erde, 1990, Wissenschaftliche Buchgesellschaft Darmstadt
- [MÜL-07] Müller Michael et.al. / Der UN-Weltklimareport, 2007, Kiepenheuer & Witsch, Köln
- [MÜN-05] Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft / Wetterkatastrophen und Klimawandel Sind wir noch zu retten?, 2005, pg Verlag, München
- [SCH-00] Schultz Gert und Engman Edwin / Remote Sensing in Hydrology and Water Management, 2000, Springer, Berlin

- [STR-99] Strahler Alan H. und Strahler Arthur N. / Physische Geographie, 1999, UTB für Wissenschaft, Stuttgart
- [VOG-00] Vogt Jürgen und Somma Francesca / Drought and Drought Mitigation in Europe, 2000, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht
- [WER-01] Werner Klaus und Weiss Hans / Schwarzbuch Markenfirmen, 2001, Deuticke, Wien
- [WER-05] Werner Klaus und Seifert Thomas / Schwarzbuch Öl, 2005, Deuticke, Wien
- [WER-08] Werner-Lobo Klaus / Uns gehört die Welt, 2008, Carl Hanser, München

Aufsätze

- [APE-05] Appel Florian et.al. / InFerno – a project for the integration of remote sensing information in operational water balance modelling and flood forecasting in: GGRS 2004 1st Göttingen GIS & Remote Sensing Days Environmental Studies, Göttinger Geographische Abhandlungen Heft 113, S. 197-203, 2005, Universität Göttingen, Göttingen
- [BAC-05] Bach Heike et.al. / Application of satellite data for flood monitoring in: GGRS 2004 1st Göttingen GIS & Remote Sensing Days Environmental Studies, Göttinger Geographische Abhandlungen Heft 113, S. 204-208, 2005, Universität Göttingen, Göttingen
- [BAM-06] Bamler Richard et.al. / Moderne Raumfahrttechniken für Prävention bei Naturkatastrophen und das Krisenmanagement, 2006, DLR, Wessling
- [BAR-06] Bartsch Annett et.al. / Microwave remote sensing of hydrology in southern Africa auf: The 2nd Göttingen GIS & Remote Sensing Days: Global Change Issues in Developing and Emerging Countries, Göttingen, Germany, 4-6 October 2006, 2006, IPF, Wien
- [BAR-07] Bartsch Annett et.al. / Relative soil moisture from C- and L-band SAR time series auf: The First Joint PI symposium of ALOS Data Nodes for ALOS Science Program, Kyoto, Japan, 19-23 November 2007, 2007, IPF, Wien
- [BAR-08] Bartsch Annett, Wagner Wolfgang / Skriptum „Global Change Monitoring“ zur gleichnamigen Lehrveranstaltung an der Technischen Universität Wien, WS 2008
- [BRE-05] Brezger Arne / Current and future impacts of flooding in urban areas: Cellina-Meduna catchment area, Friuli-Venezia Giulia, Italy in: GGRS 2004 1st Göttingen GIS & Remote Sensing Days Environmental Studies, Göttinger Geographische Abhandlungen Heft 113, S. 218-222, 2005, Universität Göttingen, Göttingen
- [CEB-05] Ceballos Antonio et.al. / Validation of ERS scatterometer-derived soil moisture data over the central part of the Duero Basin, Spain in: Hydrological Processes, Volume 19, Issue 8, May 2005, S. 1549-1566, 2005, IPF, Wien
- [FOR-07] Forster Piers et.al. / Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing in: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, S. 212, 2007, Cambridge University Press, Cambridge
- [GTZ-01] Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH / Katastrophenvorsorge, 2001, GTZ, Eschborn

- [HAS-06] Hasenauer Stefan et.al. / Implementation of near real-time soil moisture products in the SAF network based on MetOp ASCAT data auf: EUMETSAT Meteorological Satellite Conference, Helsinki, Finland, 12-16 June 2006, 2006, IPF, Wien
- [MOR-07] Morton Oliver / Climate change: Is this what it takes to save the world? in: Nature 447, S. 132-136, 10.5.2007, 2007, Macmillan Publishers Ltd., London
- [NAR-05] Narasimhan Bhuvana et.al. / Development and evaluation of Soil Moisture Deficit Index (SMDI) and Evapotranspiration Deficit Index (ETDI) for agricultural drought monitoring, 2005, Elsevier, Texas
- [NIC-00] Nicholson Sharon / Land Surface Processes And Sahel Climate in: Reviews of Geophysics 38, 1, S. 117-139, 2000, American Geophysical Union, Washington DC
- [OES-01] Oesch David / Fernerkundung und Naturgefahren – Methoden für Risk / Disaster Management und humanitäre Einsätze, 2001, Universität Bern Remote Sensing Research Group, Bern
- [PAR-06] Parajka Juraj et.al. / Assimilating scatterometer soil moisture data into conceptual hydrologic models at the regional scale in: Hydrology and Earth System Sciences, Volume 10, 2006, S. 353-368, 2006, IPF, Wien
- [POL-07] Polgreen Lydia / In Niger, Trees and Crops Turn Back the Desert in: The New York Times 11th February 2007, Reprint, 2007, The New York Times Company, New York
- [SCI-04] Scipal Klaus et.al. / Global soil moisture data and its potential for climatological and meteorological applications auf: The 2004 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference Prague, Czech Republic, 31 May-4 June 2004, 2004, IPF, Wien
- [SCI-05] Scipal Klaus et.al. / Soil moisture-runoff relation at the catchment scale as observed with coarse resolution microwave remote sensing in: Hydrology and Earth System Sciences, Volume 9, Issue 3, 2005, S. 173-183, 2005, IPF, Wien
- [SCI-06] Scipal Klaus et.al. / Development and implementation of a Discrete Global Grid System for soil moisture retrieval using the MetOp ASCAT scatterometer auf: 1st EPS/MetOp RAO Workshop, Frascati, Italy, 15-17 May 2006, 2006, IPF, Wien
- [SÖR-06] Sörgel Uwe / Stand der Technik und Trends der Radarfernerkundung in: Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik der Leibniz Universität Hannover, Nr. 263, S. 295-302, 2006, IPI, Hannover
- [WAG-00] Wagner Wolfgang et.al. / Large-scale soil moisture mapping in western Africa using the ERS Scatterometer in: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Volume 38, Issue 4 II, July 2000, S. 1777-1782, 2000, IPF, Wien

- [WAG-04] Wagner Wolfgang et.al. / Soil moisture products from c-band scatterometers: From ERS-1/2 to MetOp auf: ENVISAT & ERS Symposium, Salzburg, Austria, 6-10 September 2004, 2004, IPF, Wien
- [WAG-06-A] Wagner Wolfgang et.al. / Operational readiness of microwave remote sensing of soil moisture for hydrologic applications in: Nordic Hydrology, Volume 38, No 1, S. 1-20, 2006, IPF, Wien
- [WAG-06-B] Wagner Wolfgang et.al. / Azimuthal anisotropy of scatterometer measurements over land in: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Volume 44, Issue 8, August 2006, S. 2083-2092, 2006, IPF, Wien
- [WAG-07] Wagner Wolfgang et.al. / Initial soil moisture retrievals from the MetOp-A Advanced Scatterometer (ASCAT) in: Geophysical Research Letters, Volume 34, 2007, IPF, Wien
- [WAG-08] Wagner Wolfgang et.al. / Comparison of soil moisture fields estimated by catchment modelling and remote sensing: a case study in South Africa in: Hydrology and Earth System Sciences, Volume 12, S. 751-767, 2008, IPF, Wien
- [WOL-08] Wolski Piotr et.al. / River flow and wetland monitoring with ENVISAT ASAR Global Mode in the Okavango Basin and Delta auf: Water Resource Management conference, AfricaWRM 2008, Gaborone, Botswana, 9th-10th September 2008, 2008, IPF, Wien
- [ZHA-08] Zhao Deming et.al. / Evaluation of the ERS Scatterometer-derived soil water index to monitor water availability and precipitation distribution at three different scales in China in: Journal of Hydrometeorology, Vol. 9, S. 549-562, 2008, IPF, Wien

Internet

- [URL-01] <http://www.fe-lexikon.info/lexikon-i.htm>
Lexikon der Fernerkundung
- [URL-02] <http://www.ipf.tuwien.ac.at>
Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung an der Technischen Universität Wien
- [URL-03] <http://www.dlr.de>
Deutsches Luft- und Raumfahrtzentrum (DLR)
- [URL-04] http://www.zki.caf.dlr.de/intro_de.html
Zentrum für satellitengestützte Kriseninformation am DLR
- [URL-05] <http://www.ipcc.ch>
Intergovernmental Panel on Climate Change
- [URL-06] <http://www.wmo.int>
World Meteorological Organization
- [URL-07] <http://de.wikipedia.org>
Wikipedia – die freie Enzyklopädie
- [URL-08] http://www.ssmi.com/msu/msu_browse.html
Remote Sensing Systems (RSS)
- [URL-09] <http://www.newscientist.com/article/mg18725124.500.html>
Artikel im britischen Wissenschaftsmagazin New Scientist
- [URL-10] http://unfccc.int/files/essential_background/background_publications_htmlpdf/application/pdf/ghg_booklet_06.pdf
GHG Data 2006 – Arbeit der UNFCCC
- [URL-11] http://www.ucsusa.org/global_warming/science_and_impacts/impacts/early-warning-signs-of-global-10.html
Artikel der Union of Concerned Scientists
- [URL-12] <http://video.google.de/videosearch?q=die+arme+sau+wdr&emb=0&aq=-1&oq=die+arme+sau+wd#>
WDR-Dokumentation
- [URL-13] <http://www.nationalcenter.org/KyotoSenate.html>
Byrd-Hagel Resolution
- [URL-14] http://www.esa.int/esaEO/GGGWBR8RVDC_index_0.html
ESA über ERS 1 und ERS 2
- [URL-15] http://saturn.unibe.ch/rsbern/publication/fulltext/deza_bericht/bericht_DEZA_WWW/DEZA_bericht.html
Methoden für Risk / Disaster Management und Humanitäre Einsätze – Universität Bern
- [URL-16] <http://www.dkkv.org/>
Deutsches Komitee Katastrophenvorsorge
- [URL-17] <http://www.bmz.de>
Deutsches Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung
- [URL-18] http://www.preventionweb.net/files/2548_WMO993.pdf
Preventing and mitigating natural disasters – Bericht der WMO
- [URL-19] <http://www.gtz.de>
Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit GmbH
- [URL-20] <http://earthobservatory.nasa.gov/>
NASAs Earth Observatory

- [URL-21] http://www.disasterscharter.org/about_e.html
International Charter – Space and major disasters
- [URL-22] <http://www.fema.gov/index.shtm>
Nationale Koordinationsstelle für Katastrophenhilfe der USA
- [URL-23] <http://www.radartutorial.eu/>
Grundlagen der Radartechnik
- [URL-24] <http://www.dlr.de/HR/>
Institut für Hochfrequenztechnik und Radarsysteme des DLR in Oberpfaffenhofen-Weßling
- [URL-25] <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2008:092:0003:0011:DE:PDF>
Verordnung (EG) Nr. 303/2008 der Kommission
- [URL-26] <http://www.usgs.gov/>
United States Geological Survey
- [URL-27] http://www.sundayherald.com/news/heraldnews/display.var.2104849.0.2008_the_year_of_global_food_crisis.php
Artikel in der Sunday Herald
- [URL-28] http://www.panda.org/news_facts/newsroom/index.cfm?uNewsID=64220
World Wide Fund For Nature
- [URL-29] <http://www.fao.org/nr/water/issues/scarcity.html>
Food and Agriculture Organization
- [URL-30] http://tuwis.tuwien.ac.at/ora/tuwis/bokudok/search_project.show_project?project_id_in=3766
Informationssystem der TU Wien
- [URL-31] <http://www.ens-newswire.com/ens/oct2005/2005-10-24-05.asp>
Artikel aus der Umwelt-Nachrichtenagentur Environment News Service
- [URL-32] <http://forests.org/shared/reader/welcome.aspx?linkid=63511&keybold=climate%20drought%20water%20catchment>
Artikel im Forest Protection Portal
- [URL-33] http://www.chinadaily.com.cn/english/doc/2004-07/24/content_351196.htm
Artikel aus der englischsprachigen, chinesischen Tageszeitung China Daily
- [URL-34] <http://www.newscientist.com/article/dn12397>
Artikel im britischen Wissenschaftsmagazin New Scientist
- [URL-35] http://www.tuwien.ac.at/aktuelles/news_detail/article/5236/
Presseaussendung der TU Wien vom 27. Oktober 2008
- [URL-36] <http://dx.doi.org/10.1016%2Fj.chemosphere.2004.08.022>
Artikel von David Stern in Science Direct

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildungen

Deckblatt

Logo IPF <http://www.ipf.tuwien.ac.at/>
Signet IfGR <http://www.univie.ac.at/geographie/>

Titelseite (von links oben nach rechts unten)

ERS 1 http://ceos.cnes.fr:8100/cdrom-00/ceos1/satellit/envisat/supocs00/ersons00/ers_1_v3.jpg

Schiff im Aralsee <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:AralShip.jpg&filetimestamp=20051012080127>

Karte Kenia (Jän. 09) <http://earthobservatory.nasa.gov/NaturalHazards/view.php?id=36683>

Brüchiger Boden mit Gräsbüschel <http://www.dfki.de/~gebhard/images/privat/wallpapers/1280x1024/duerre-1280x1024.jpg>

Vertrocknetes Getreide http://staffwww.fullcoll.edu/tmorris/elements_of_ecology/images/drought_corn.jpg

Schwimmen verboten <http://www.lilith-ezine.com/articles/environmental/Australian-Drought.html>

Inhalt

Abbildung 1 Le Monde Diplomatique / Atlas der Globalisierung, 2007, Taz, Berlin
Abbildung 2 Le Monde Diplomatique / Atlas der Globalisierung, 2007, Taz, Berlin
Abbildung 3 Le Monde Diplomatique / Atlas der Globalisierung spezial: Klima, 2008, Taz, Berlin
Abbildung 4 <http://jwocky.gsfc.nasa.gov/>
Abbildung 5 Jensen John R. / Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective, 2007, Pearson Education Inc., Upper Saddle River
Abbildung 6 Vogt Jürgen und Somma Francesca / Drought and Drought Mitigation in Europe, 2000, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht
Abbildung 7 <http://www.treehugger.com/files/2008/03/drought-around-world-atlanta-perspective.php>
Abbildung 8 <http://www.fao.org/nr/water/art/2008/wateruse.htm>
Abbildung 9 Le Monde Diplomatique / Atlas der Globalisierung spezial: Klima, 2008, Taz, Berlin
Abbildung 10 <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Bild:Bodenwasser.png&filetimestamp=20060208214224>

- Abbildung 11 Jensen John R. / Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective, 2007, Pearson Education Inc., Upper Saddle River
- Abbildung 12 Le Monde Diplomatique / Atlas der Globalisierung, 2007, Taz, Berlin
- Abbildung 13 Le Monde Diplomatique / Atlas der Globalisierung, 2007, Taz, Berlin
- Abbildung 14 Albertz Jörg / Einführung in die Fernerkundung, 2007, Wissenschaftliche Buchgesellschaft Darmstadt
- Abbildung 15 Albertz Jörg / Einführung in die Fernerkundung, 2007, Wissenschaftliche Buchgesellschaft Darmstadt
- Abbildung 16 Jensen John R. / Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective, 2007, Pearson Education Inc., Upper Saddle River
- Abbildung 17 Jensen John R. / Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective, 2007, Pearson Education Inc., Upper Saddle River
- Abbildung 18 <http://www.vvs.fraunhofer.de/de/downloads/future-security/Bamler.pdf>
- Abbildung 19 <http://www.vvs.fraunhofer.de/de/downloads/future-security/Bamler.pdf>
- Abbildung 20 Jensen John R. / Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective, 2007, Pearson Education Inc., Upper Saddle River
- Abbildung 21 Jensen John R. / Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective, 2007, Pearson Education Inc., Upper Saddle River
- Abbildung 22 Jensen John R. / Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective, 2007, Pearson Education Inc., Upper Saddle River
- Abbildung 23 Jensen John R. / Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective, 2007, Pearson Education Inc., Upper Saddle River
- Abbildung 24 Jensen John R. / Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective, 2007, Pearson Education Inc., Upper Saddle River
- Abbildung 25 Jensen John R. / Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective, 2007, Pearson Education Inc., Upper Saddle River
- Abbildung 26 <http://www.google.com/search?q=the+amazon%27s+seasonal+secret>
- Abbildung 27 Jensen John R. / Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective, 2007, Pearson Education Inc., Upper Saddle River
- Abbildung 28 Jensen John R. / Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective, 2007, Pearson Education Inc., Upper Saddle River
- Abbildung 29 Albertz Jörg / Einführung in die Fernerkundung, 2007, Wissenschaftliche Buchgesellschaft Darmstadt
- Abbildung 30 Albertz Jörg / Einführung in die Fernerkundung, 2007, Wissenschaftliche Buchgesellschaft Darmstadt
- Abbildung 31 Albertz Jörg / Einführung in die Fernerkundung, 2007, Wissenschaftliche Buchgesellschaft Darmstadt
- Abbildung 32 Albertz Jörg / Einführung in die Fernerkundung, 2007, Wissenschaftliche Buchgesellschaft Darmstadt
- Abbildung 33 Albertz Jörg / Einführung in die Fernerkundung, 2007, Wissenschaftliche Buchgesellschaft Darmstadt
- Abbildung 34 Albertz Jörg / Einführung in die Fernerkundung, 2007, Wissenschaftliche Buchgesellschaft Darmstadt
- Abbildung 35 Albertz Jörg / Einführung in die Fernerkundung, 2007, Wissenschaftliche Buchgesellschaft Darmstadt
- Abbildung 36 Jensen John R. / Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective, 2007, Pearson Education Inc., Upper Saddle River
- Abbildung 37 Jensen John R. / Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective, 2007, Pearson Education Inc., Upper Saddle River

- Abbildung 38 Albertz Jörg / Einführung in die Fernerkundung, 2007, Wissenschaftliche Buchgesellschaft Darmstadt
- Abbildung 39 Albertz Jörg / Einführung in die Fernerkundung, 2007, Wissenschaftliche Buchgesellschaft Darmstadt
- Abbildung 40 Albertz Jörg / Einführung in die Fernerkundung, 2007, Wissenschaftliche Buchgesellschaft Darmstadt
- Abbildung 41 Jensen John R. / Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective, 2007, Pearson Education Inc., Upper Saddle River
- Abbildung 42 Jensen John R. / Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective, 2007, Pearson Education Inc., Upper Saddle River
- Abbildung 43 Jensen John R. / Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective, 2007, Pearson Education Inc., Upper Saddle River
- Abbildung 44 Albertz Jörg / Einführung in die Fernerkundung, 2007, Wissenschaftliche Buchgesellschaft Darmstadt
- Abbildung 45 <http://www.ipf.tuwien.ac.at/radar/ascats/publ/0019.pdf>
- Abbildung 46 <http://www.deos.tudelft.nl/ers/ers2info.html>
- Abbildung 47 <http://www.ipf.tuwien.ac.at/radar/index.php?go=gallery>
- Abbildung 48 <http://ceos.cnes.fr:8100/cdrom-00b2/ceos1/satellit/ers/ers/earonc00.htm>
- Abbildung 49 <http://www.ipf.tuwien.ac.at/radar/ascats/publ/0019.pdf>
- Abbildung 50 <http://www.ipf.tuwien.ac.at/radar/scansar/publ/0022.pdf>
- Abbildung 51 <http://en.wikipedia.org/wiki/MetOp>
- Abbildung 52 http://esamultimedia.esa.int/images/metop/Met_PLM&SMDV1200_gr1.1totalconfig.jpg
- Abbildung 53 http://www.ipf.tuwien.ac.at/radar/sec/a_publ/0024.pdf
- Abbildung 54 http://www.ipf.tuwien.ac.at/radar/sec/a_publ/0021.pdf
- Abbildung 55 <http://www.ipf.tuwien.ac.at/radar/scansar/publ/0005.pdf>
- Abbildung 56 <http://www.ipf.tuwien.ac.at/radar/scansar/publ/0005.pdf>

Tabellen

Tabelle	1	Bartsch Annett / Folien zur Lehrveranstaltung „Global Change Monitoring“ an der Technischen Universität Wien, WS 2008
Tabelle	2	Albertz Jörg / Einführung in die Fernerkundung, 2007, Wissenschaftliche Buchgesellschaft Darmstadt
Tabelle	3	http://www.ipf.tuwien.ac.at/radar/ascapub/0019.pdf
Tabelle	4	http://www.ipf.tuwien.ac.at/radar/ascapub/0002.pdf

Abkürzungen und Fremdbuchstaben

Abkürzungen

AMI	Active Microwave Instrument
AMSR-E	Advanced Microwave Scanning Radiometer-EOS
APAR	Absorbed Photosynthetically Active Radiation
ASAR	Advanced Synthetic Aperture Radar
ASCAT	Advanced Scatterometer
ATSR	Along-Track Scanner Radiometer
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer
BUFR	Binary Universal Form for the Representation of meteorological data (binäres Datenformat der WMO)
CDA	Command and Data Acquisition (Abteilung von EUMETSAT)
CNES	Centre National d'Études Spatiales
CSIRO	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization
DFD	Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum
DLR	Deutsches Luft- und Raumfahrtzentrum
DU	Dobson Unit
EARS	EUMETSAT Advanced Retransmission Service
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
ENSO	El Niño Southern Oscillation
ENVISAT	Environmental Satellite
ESA	European Space Agency
ERS	European Remote Sensing Satellite
ESCAT	ERS Scatterometer
EUMETSAT	European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites
FAO	Food and Agriculture Organization
GOES	Geostationary Operational Environmental Satellite
GOME	Global Ozone Mapping Experiment
GPM	Global Precipitation Measurement
GPS	Global Positioning System
GRACE	Gravity Recovery And Climate Experiment
GRIB	Gridded Binary (Datenformat für meteorologische Daten)
HH	Horizontal-Horizontal (Emission wie Empfang von Mikrowellen sind horizontal polarisiert)
HYDROS	Hydrosphere State
IDL	Interactive Data Language
IIASA	Internationales Institut für Angewandte Systemanalyse
IMO	International Meteorological Organization
InSAR	Interferometric Synthetic Aperture Radar
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IPF	Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der TU Wien
ITT VIS	International Telephone & Telegraph Visual Information Solutions
IWF	Internationaler Währungsfonds
JRC	Joint Research Centre
LAD	Leaf Area Density
LAI	Leaf Area Index
LRR	Laser-Retroreflector

METEOSAT	Meteorological Satellite
MetOp	Meteorological Operational Polar Satellite
MIR	Mittleres Infrarot
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
MSG	Meteosat Second Generation
Mtoe	Megatonne Öleinheit
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NEXRAD	Next-Generation Radar (Radarnetzwerk der NOAA)
NIR	Nahes Infrarot
NN	Normalnull (Bezugsfläche für den Meeresspiegel)
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NWP SAF	Numerical Weather Prediction Satellite Application Facility (Projekt von EUMETSAT)
PPF	Product Processing Facility (Abteilung von EUMETSAT)
ppb	parts per billion (Teile pro Milliarde)
ppm	parts per million (Teile pro Million)
ppt	parts per trillion (Teile pro Billion)
PRARE	Precise Range and Range Rate Equipment
PWP	Permanenter Welkepunkt
RA	Radar Altimeter
RFI	Radio Frequency Interference
SADC	Southern African Development Community
SAF	Satellite Application Facility (Netzwerk von EUMETSAT)
SAR	Synthetic Aperture Radar
SHARE	Soil Moisture for Hydrometeorologic Applications in the SADC Region (Projekt am IPF)
SLAR	Sidelooking Airborne Radar
SMOS	Soil Moisture and Ocean Salinity Mission
SNR	Signal to Noise Ratio
SPOT	Système Probatoire d'Observation de la Terre
SR	Simple Ratio (Vegetationsindex)
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
SSDS	Surface Soil Degree of Saturation (Feuchte des obersten Bodenzentimeters)
SSM/I	Special Sensor Microwave Imager
SWI	Soil Water Index (Profil-Bodenfeuchte)
TDR	Time Domain Reflectometry
TIROS	Television Infra-Red Observing Satellite
TVI	Transformed Vegetation Index
UNEP	United Nations Environment Programme
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change
UNO	United Nations Organization
USDA	United States Department of Agriculture
USGS	United States Geological Survey
VCI	Vegetation Condition Index
VV	Vertikal-Vertikal (Emission wie Empfang von Mikrowellen sind vertikal polarisiert)
WMO	World Meteorological Organization
ZAMG	Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik
ZKI	Zentrum für satellitengestützte Kriseninformation

Fremdbuchstaben

α	Alpha	Absorptionsgrad
Δ	Delta	Differenz
ε	Epsilon	ε_r = relative Permittivität
λ	Lambda	Wellenlänge
μ	Mü	Mikro-
ρ	Rho	Reflexionsgrad elektromagnetischer Strahlen
σ	Sigma	σ^0 = Wert des Backscatters
τ	Tau	Transmissionsgrad elektromagnetischer Strahlen
θ	Theta	Einfallswinkel
ν	Ypsilon	Frequenz

Lebenslauf



Persönliche Daten

Geburtsort- und Datum:	Wien-Hütteldorf am 8. Oktober 1981
Staatsbürgerschaft:	Österreich
Familienstand:	ledig
Vater:	Dr. Knut Mitis, Pensionist (Ex-Angestellter der WKÖ, Sektion Tourismus)
Mutter:	Theresa Mitis, geb. Garstenauer

Schulbildung & Berufserfahrung

Ausbildung

1988 bis 1992	Volksschule in Pressbaum
1992 bis 1996	Unterstufen-Realgymnasium am Sacré Coeur Pressbaum
1996 bis 2001	Bundes-Handelsakademie Wien 13 mit abgeschlossener Matura (dazu Buch zum Projekt im Fach Marketing und internationale Geschäftstätigkeit)
Herbst 2003	Besuch des Kollegs Bauwesen – Bau- und Informationstechnologie

Studium

Feb. 2004 bis Juli 2007	Geographie am Institut für Geographie & Regionalforschung (IfGR) der Universität Wien
Juli 2007	Abschluß des 1. Studienabschnitts (1. Diplom)
Sep. 2006 bis Okt. 2009	Kartographie und Geoinformation (am IfGR, Kartographie und Geoinformation der Universität Wien) Teilnahme an Lehrveranstaltungen im Bereich GIS (Geographische Informationssysteme), Multimedia und Fernerkundung am IfGR sowie an der TU Wien-Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung (IPF)

Okt. 2008 bis Jän. 2009	Tutor zur Lehrveranstaltung „Programmierung in der Geokommunikation“
Okt. 2008 bis Okt. 2009	Diplomarbeit zum Thema „Globale Erwärmung – Einsatzmöglichkeiten der Fernerkundung gegen Dürre“ am IfGR und IPF der TU Wien Betreuer (Universität Wien): Dipl.Ing. Dr. Wolfgang Kainz Betreuer (TU Wien): Dipl.Ing. Dr. Wolfgang Wagner
Projekte	
Sep. 2000 bis Juni 2001	Industrieexporte in den Osten am Beispiel der Frantschach AG
Okt. 2007 bis Jän. 2008	Stadtplan Wien Zentrum im Seminar „Kartographische Gestaltungs- und Entwurfslehre“
Mai 2008 bis Juni 2008	In Vino Veritas – Multimediale Karte der Gemeinde Stoitzendorf im Zuge der Exkursion „Geo-Multimedia in der Praxis“
Sonstiges	
23. bis 26. Juli 2005	Teilnehmer der 25. ESRI User Conference in San Diego, USA
13. bis 17. Juli 2009	Teilnehmer der 29. ESRI User Conference in San Diego, USA
Berufserfahrung	
Herbst 2001	Kommissionierung von Kalendern für Firma Ba-Ku
Feb. 2002 bis Jän. 2003	Zivildienst beim Samariterbund Purkersdorf (NÖ) als Rettungssanitäter
Frühjahr 2003	Mitarbeiter bei Dialog Direct
Frühjahr 2008	Arbeiter bei Scholzen & Bochorak OEG
Besondere Kenntnisse	
✓ Textverarbeitung ✓ MS-Office 2007 ✓ ArcGIS (ArcInfo 9.3 und ArcView 9.3) ✓ Adobe Photoshop CS4 ✓ Adobe Illustrator CS3	
Weitere Kenntnisse	
Software ✓ Apple Mac ✓ Bryce 3D 5.5 ✓ Cinema 4D R10.5 ✓ Erdas Imagine 8 ✓ Google Maps ✓ Google Earth ✓ Google SketchUp 5 ✓ iMovie HD 5 ✓ Macromedia Director 10 ✓ Adobe Dreamweaver CS3 ✓ QTVR ✓ SSPS 15.0 ✓ VR Worx	

		Programmiersprachen ✓ HTML ✓ IDL ✓ Java ✓ PHP 5	
Sprachen			
<i>Sprache</i>	<i>Sprechen</i>	<i>Schreiben</i>	<i>Lesen</i>
Deutsch		Muttersprache	
Englisch	Gut	Gut	Ausgezeichnet
Spanisch	Mittel	Mittel	Gut
Freizeitaktivitäten			
✓	Lesen von Sachbüchern (von Politik bis Parapsychologie)		
✓	Verfassen von Rezensionen dieser		
✓	Sport (insbesondere Langstreckenläufe) & Jonglieren		
✓	GIS (Geographische Informationssysteme)		
✓	Fernerkundung		
✓	Luftfahrt		
✓	Raumfahrt		
✓	Globalisierung		
✓	Internet		