

Received: 23.04.2012 Received in revision: 23.07.2012 Accepted: 19.11.2012 Published: 21.12.2012



Dr. Detlef Deumlich  
Struktur und Prozess - Einfluss historischer  
Landbewirtschaftung auf lineare Fließwege  
bei Starkregen in Brandenburg (D)  
Landscape Online 31, 1-19 . DOI:10.3097/LO.201231

## Structure and Process - Influence of Historical Agriculture of Linear Flow Paths by Extreme Rainfall in Brandenburg

**Dr. Detlef Deumlich**

Institute of Soil Landscape Research  
Leibniz-Center for Agricultural Landscape Research (ZALF), Müncheberg  
Eberswalder Str. 84, 15374 Müncheberg, Germany  
Phone: +49 33432 82329, FAX: +49 33432 82280  
ddeumlich@zalf.de

### Abstract

Long-term erosion forecast can completely misinterpret in extreme events in plain regions. Flow paths are well represented in the plain using digital elevation models in the 1-m grid (DEM1). The scale of the erosion process models and the elevation models is comparable. With it instruments are available to improve the erosion simulation.

Simulations, based on (R)USLE family and bigger grid width, are relevant for regional overviews, to the clarification of small scale relevant linear erosion forms, however, unsuitably.

The cross-slope tillage has intensified the water erosion in the examined case with special area morphology. From historical sources furrows of the ridge and furrow system were identified as runoff ways.

Historical and actual information sources allowed the clarification of especially regional erosion events. Site specific and climatic factors as well as the actual land management caused a high damage magnitude in particular with extreme rainstorms, modified by historical land use structures.

### Keywords:

water erosion, historical land use, rainstorm, model, morphology,  
RUSLE, EROSION-3D, ridge and furrow system

Received: 23.04.2012 Received in revision: 23.07.2012 Accepted: 19.11.2012 Published: 21.12.2012



Dr. Detlef Deumlich  
Struktur und Prozess - Einfluss historischer  
Landbewirtschaftung auf lineare Fließwege  
bei Starkregen in Brandenburg (D)  
Landscape Online 31, 1-19 . DOI:10.3097/LO.201231

## Struktur und Prozess – Einfluss historischer Landbewirtschaftung auf lineare Fließwege bei Starkregen in Brandenburg (D)

**Detlef Deumlich**

Institut für Bodenlandschaftsforschung  
Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) e.V. Müncheberg  
Eberswalder Str. 84, 15374 Müncheberg, D  
Phone: +49 33432 82329, FAX: +49 33432 82280  
ddeumlich@zalf.de

### Zusammenfassung

---

Längerfristige Erosionsprognosen können bei Extremereignissen im Flachland völlig fehlgreifen. Fließwege sind im Flachland erst mit digitalen Geländemodellen im 1-m-Raster (DGM1) gut abbildbar. Die Skala von Erosionsprozess- und Geländemodell ist vergleichbar. Damit stehen Instrumente zur Verfügung, die Erosionssimulation zu verbessern.

Anwendungen, basierend auf der (R)USLE-Familie und größere Rasterweiten, sind für regionale Überblicke relevant, zur Aufklärung kleinskalig relevanter linearer Erosionsformen aber ungeeignet.

Die Querbearbeitung verschärfte im untersuchten Fall bei besonderer Geländemorphologie die Wassererosion. Aus historischen Quellen wurden Furchen der Wölbäcker als Abflussbahnen identifiziert.

Historische und aktuelle Informationsquellen ermöglichten die Aufklärung spezieller regionaler Erosionsereignisse. Standörtliche und klimatische Faktoren sowie die aktuelle Bewirtschaftung verursachten ein hohes Schadensausmaß insbesondere bei extremen Starkregen, modifiziert durch historische Landnutzungsstrukturen.

### Schlagworte

Wassererosion, historische Landnutzung, Starkregen, Modell,  
Morphologie, ABAG, EROSION-3D, Wölbäcker

## 1 Problemstellung

Mittel- und langfristige Erosionsprognosen können bei bestimmter Konstellation des Zusammentreffens der Kausalfaktoren (Starkniederschlag, Morphologie, Landnutzung) völlig fehlgreifen. Die Abbildung der potentiellen Erosionsgefährdung orientiert sich jedoch an derartigen Prognosen, um mittlere Bedingungen zu veranschaulichen, z.B. die Karte der Erosionsgefährdung ackerbaulich genutzter Böden durch Wasser im Nationalatlas Deutschland (Fohrer et al., 2003). Grundlage dieser Art Karten bilden empirische Modelle wie die Allgemeine Bodenabtragsgleichung (Schwertmann et al., 1990), PESERA (Kirkby et al., 2004) oder andere. Kleinräumig existierende historische Kartierungen schwerer Erosionsschäden sind insbesondere aus Gebieten mit größeren Hanglagen der Vorgebirge bekannt (Hempel, 1954). Sie zeigen die im 18. Jh. aufgetretenen Erosionsschäden in den schmalen Hochackerfluren im Eichsfeld. Ähnlich exzessive Bodenerosion wird auch von Hard (1970) für die gleiche Periode in Südwestdeutschland dokumentiert. Bork et al. (1999) berichten über die durch Extremereignisse zwischen 1310 und 1350 verursachten Erosionsschäden, die zu gravierenden anschließenden Nutzungsänderungen in Mitteleuropa führten. Gefördert wurden die Bodenabträge unter anderem durch die Nutzung von Wölbackerfluren. Simulationsrechnungen zum Einfluss von Klima- und Landnutzungsänderungen für Entwicklungszeitpunkte seit dem Neolithikum in Belgien zeigen den bekannten Einfluss der sich vollziehenden Landnutzungsänderungen durch den Menschen (Notebaert et al., 2011). Der anthropogen bedingte Landnutzungswandel und die Ausdehnung der Agrarflächen in stärker reliefierte Bereiche ohne Beachtung standörtlicher Bedingungen führt zu der derzeit als ein Hauptproblem der Menschheit betrachteten weltweiten Bodenerosion (Montgomery, 2010, Bork et al., 1998, Pimentel & Kounang, 1998).

Im Jahr 2007 erreichte die Häufigkeit von Starkregen in Brandenburg einen neuen Rekord. Viele auch als nicht erosionsgefährdet klassifizierte Gebiete im flachen Gelände waren betroffen. Deshalb wurde im Auftrag und mit Unterstützung des

Landwirtschaftsministeriums in Brandenburg eine Studie nach Erosionsschäden nahe dem Beetzsee in der Gemarkung Radewege bei Brandenburg realisiert. Dort waren in einem Maisschlag in Gefälle-senkrecht zur Bearbeitungsrichtung regelhafte Erosionsspuren von Rillen bis zu tiefen, breiten Gräben aufgetreten und wasserwirtschaftliche Anlagen durch Sedimenteinträge funktionsuntüchtig geworden. Nach den Erosionsereignissen enormen Ausmaßes konnten die erfassten Ursachen der Bodenverlagerungen mit Modellergebnissen verglichen werden. Da ähnliche Ereignisse aus den vergangenen Jahren und aus anderen Regionen bekannt geworden sind, werden die Schrittfolge der Analyse und der Einfluss von Strukturen in der Agrarfläche dargestellt.

## 2 Gebietscharakteristik und Methodik

### 2.1 Standort/Morphologie

Der Standort (Lat.: 33 U 333313, Long: 5817664, Alt: 33 m) ist in der Mittelmaßstäbigen Landwirtschaftlichen Standortkartierung (MMK, BGR 1995) als D3a (Sand und Tieflehm der „welligen Platte“) und in den Randbereichen als D1a-Standort (durchgehend „armer“ Sand der „flach welligen Platte“) eingestuft. Als Böden werden pseudovergleyte Fahlerden aus Sand über Lehm mit Braunerden aus Sand über einer teils mächtigen Lehmschicht ausgewiesen. Geologisch handelt es sich um Grundmoräne, die zum Teil übersandet ist. Der Pflughorizont besteht überwiegend aus schwach schluffigem Sand (Su2). Die Erodierbarkeit dieser Bodenart ist als mittel eingestuft (bodenbedingte Wassererosionsgefährdung nach DIN 19708). Die Verschlammungsneigung ist stark bis sehr stark (ad-hoc Boden, 2005). Die maximale Hangneigung erreicht nur 5%.

### 2.2 Niederschlag

Die mittlere Niederschlagsmenge beträgt ca. 550 mm (Krumbiegel & Schwinge, 1991). Die Regenerosivität (DIN 19708), ein Parameter aus Regenenergie, -menge und -intensität wird mit 35 – 50 N/h im langjährigen Mittel für Brandenburg angegeben. Ihre höchste Erosivität erreichen die konvektiven Niederschläge in den Monaten Juni bis August (Deumlich, 1999).

### 2.3 Landnutzung

**M**ais wurde als Hauptfrucht Ende April senkrecht zur Gefällerrichtung, d.h. in Querbearbeitung nach konventioneller Bodenbearbeitung im Herbst 2006 angebaut. Dazu wurden 300 dt/ha Stallmist bei der Herbstfurche eingearbeitet. Die Saatbettbereitung im April erfolgte mit einem Flügelschargrubber.

### 2.4 Einschätzungen der Erosionsgefährdung

#### 2.4.1 Niederschlag und Berechnung von Parametern

**E**in amtliches Gutachten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) wurde angefordert. Der DWD stellte darüber hinaus Archivdaten der Radarniederschlagsprodukte RZ, RY, RW aus RADOLAN (Weigl, 2007) für 1 km Rasterweite zur Verfügung. Die drei Radarniederschlagsprodukte liefern Niederschlagsmengen verschiedener zeitlicher Auflösung von 5 Minuten bzw. 1 Stunde und Bodenaneichungsqualität. Dafür und für Daten einer regionalen ZALF-Station (Paulinenaue, Distanz 24 km) wurden wesentliche Starkregenparameter berechnet.

Die Erosivität der Niederschläge ( $EI_{30}$ , DIN 19708) und Intensitäten mit 5, 10 und 30 Minuten Auflösung wurden für die Starkregenereignisse berechnet (ZALF-Station, RADOLAN) nach Gl. (1):

$$EI_{30} = \sum (E_i) * I_{30} \text{ in [N/h]} \quad (1)$$

$$E_i = (11,89 + 8,73 \log I_i) * N_i \text{ in [J/m}^2\text{]} \text{ für } I_i \geq \sum 0,05 \text{ mm/h}$$

$$E_i = 0 \text{ J/m}^2 \text{ für } I_i < 0,05 \text{ mm/h}; E_i = 28,33 N_i \text{ J/m}^2 \text{ für } I_i > 76,2 \text{ mm/h} \quad (2)$$

$EI_{30}$  – R-Wert,  $E_i$  – Energie,  $I_i$  – Intensität,  $N_i$  – Regenmenge,  $i$  – Zeitspanne gleicher Regenintensität nach Wischmeier & Smith (1978).

Ein vom DWD als 100 jährlich eingestufte Modellregen wurde für die Erosionsberechnungen mit dem nachfolgend beschriebenen Prozessmodell genutzt (Abb. 1).

#### 2.4.2 Modelle

**N**eben der Allgemeinen Bodenabtragungsgleichung (Abk. ABAG, Schwertmann et al., 1990, DIN 19708) zur landesweiten Erosionsabschätzung wurde

das Prozessmodell Erosion-3D (Schmidt et al., 1996; v. Werner, 2005) in der Version 3.1.5.14 (v. Werner, 2010) und der dazugehörige Parameterkatalog (Michael et al., 1996) für fein auflösende Berechnungen der Bodenabträge des Schadensgebiets genutzt.

Die erforderlichen Eingangsdaten wurden aus Bodenkarten (ALK-Folie 42 „Bodenschätzung“ (Mdi Brandenburg, 2004)), der extrapolierten Mittelmaßstäbigen Landwirtschaftlichen Standortkartierung (MMK, BGR 1995, Böhm et al., 2009) und dem hochgenauen Abbild der Landoberfläche (Digitales Geländemodell mit 1m Kantenlänge, DEM1) aus Airborne Laserscanning (ALS, flugzeugbasierte Entfernungsmessung) bzw. dem DEM25 (LGB Brandenburg) sowie dem Parameterkatalog von EROSION-3D synthetisiert.

Sämtliche Gebietsanalysen und Kartierungen erfolgten unter Nutzung von GIS (ArcINFO 9.3, ArcView 3.2, ESRI, 2006).

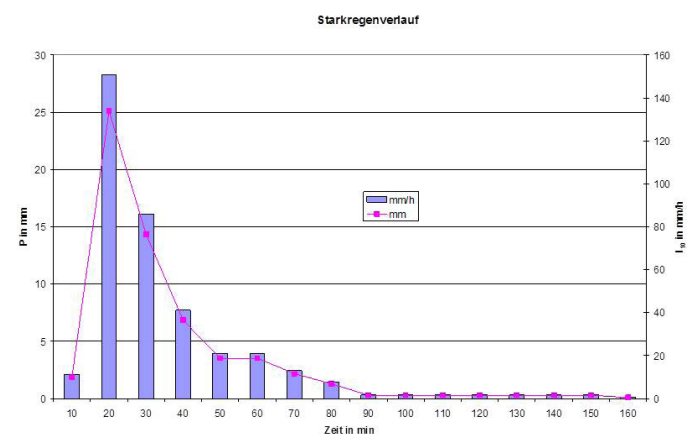


Abbildung 1: Struktur des Modellregens geringer Jährlichkeit (einmal in 100 Jahren)

Figure 1: Structure of the model rain of low return (once in 100 years)

### 2.5 Schadensaufnahme

**D**ie Schadenskartierung erfolgte unter Nutzung der Kartieranleitung (DVWK, 1996). Das Schadensausmaß wurde volumetrisch mit Zollstock und GPS GARMIN abschnittsweise entlang des Erosionssystems erfasst.

### 3 Ergebnis und Diskussion

Das Schadensgebiet ist in der Erosionsgefährdungskarte Brandenburgs basierend auf Berechnungen mit der ABAG unter Verwendung des DEM25 als nicht bis gering wassererosionsgefährdet eingestuft (Abb. 2a). Die flächenhafte Verteilung der mittleren langjährigen potentiellen Bodenabträge zeigt

im Muldenbereich im mittleren Schlagteil etwas höhere Werte mit Maxima bis zu 2 t/ha. Dort wurden die größten Schäden angetroffen (Abb. 2b), aber auch die benachbarten Areale (berechnet mit  $<0,3$  t/ha) wiesen 2007 ungeachtet der geringen Hangneigung  $<5\%$  starke Bodenverlagerungen auf (Abb. 3). Nachfolgend wird die Niederschlags-situation im Schadenszeitraum speziell dargestellt.

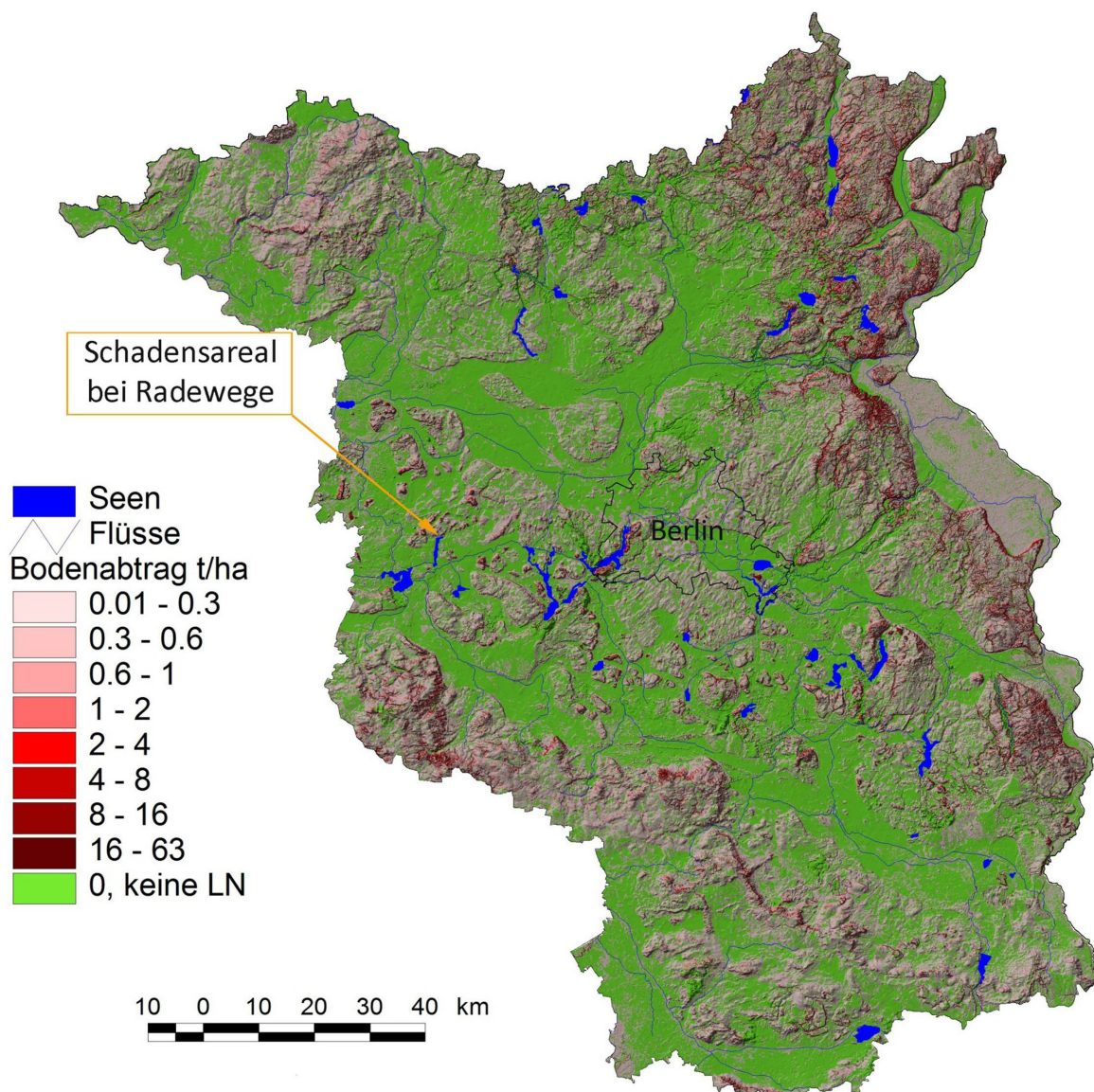


Abbildung 2a: Karte des potentiellen Bodenabtrags durch Wassererosion nach DIN 19708 (ABAG) in t/ha des Landes Brandenburg (Deumlich, 2012)

Figure 2a: Map of potential soil loss by water erosion to DIN 19708 (ABAG) in t/ha of the Federal State of Brandenburg (Deumlich, 2012)

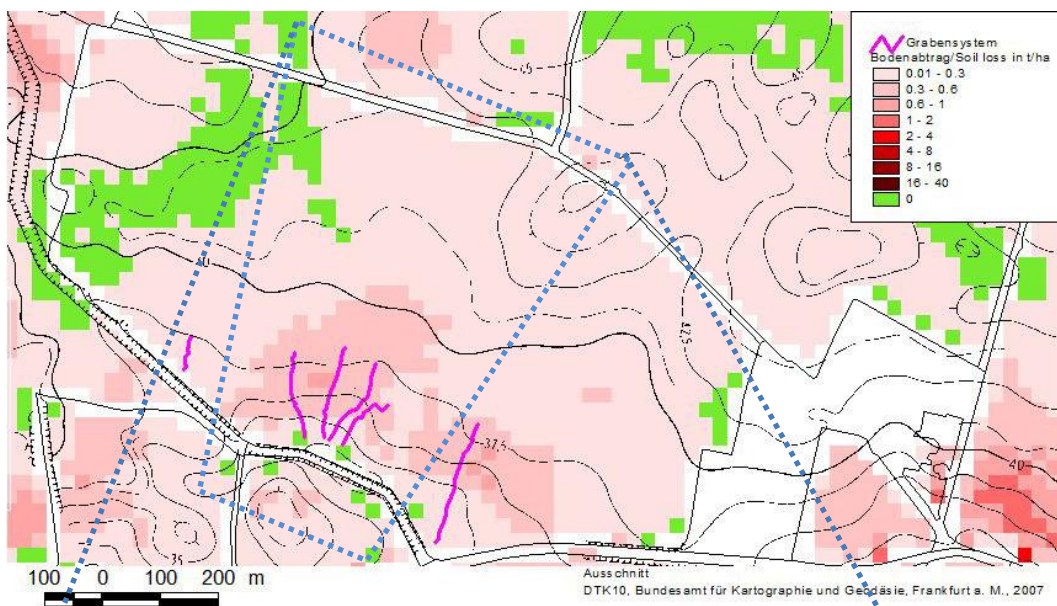


Abbildung 2b: Detail aus Abb. 2a für das Schadensareal, mit Rahmen des Luftbilds

Figure 2b: Detail from fig. 2a for the damaged field, with frame of the aerial photo



Abbildung 3: Luftaufnahme des Erosionssystems Mitte August

Figure 3: Aerial photo of the erosion system at the middle of August

### 3. 1 Niederschlagssituation:

Im amtlichen Gutachten des DWD wurde vermerkt: „dass es im betrachteten Gebiet seit 1951 keine so hohe Mai-Niederschlagssumme gegeben hat wie im Mai 2007. Die monatlichen Niederschlagshöhen im Juni, Juli, August und September 2007 besetzen zwar nicht den Spitzenplatz in der jeweiligen Rekordliste je Kalendermonat, sind jedoch so beträchtlich, dass

der 5-Monate-Wert der Niederschlagshöhe (Mai bis September) den Rang 1 in der jährlichen Serie der 5-Monate-Werte der Niederschlagshöhe ... im Raum Brielow belegt.“ (Malitz, 2007)

Auch die Intensitäten der Niederschläge waren ziemlich hoch (>40 mm in 6 Stunden), wie z.B. ein Bild des deutschlandweiten Niederschlagsradars für den Schadenstag 22. Juli 2007 zeigt (Abb. 4).

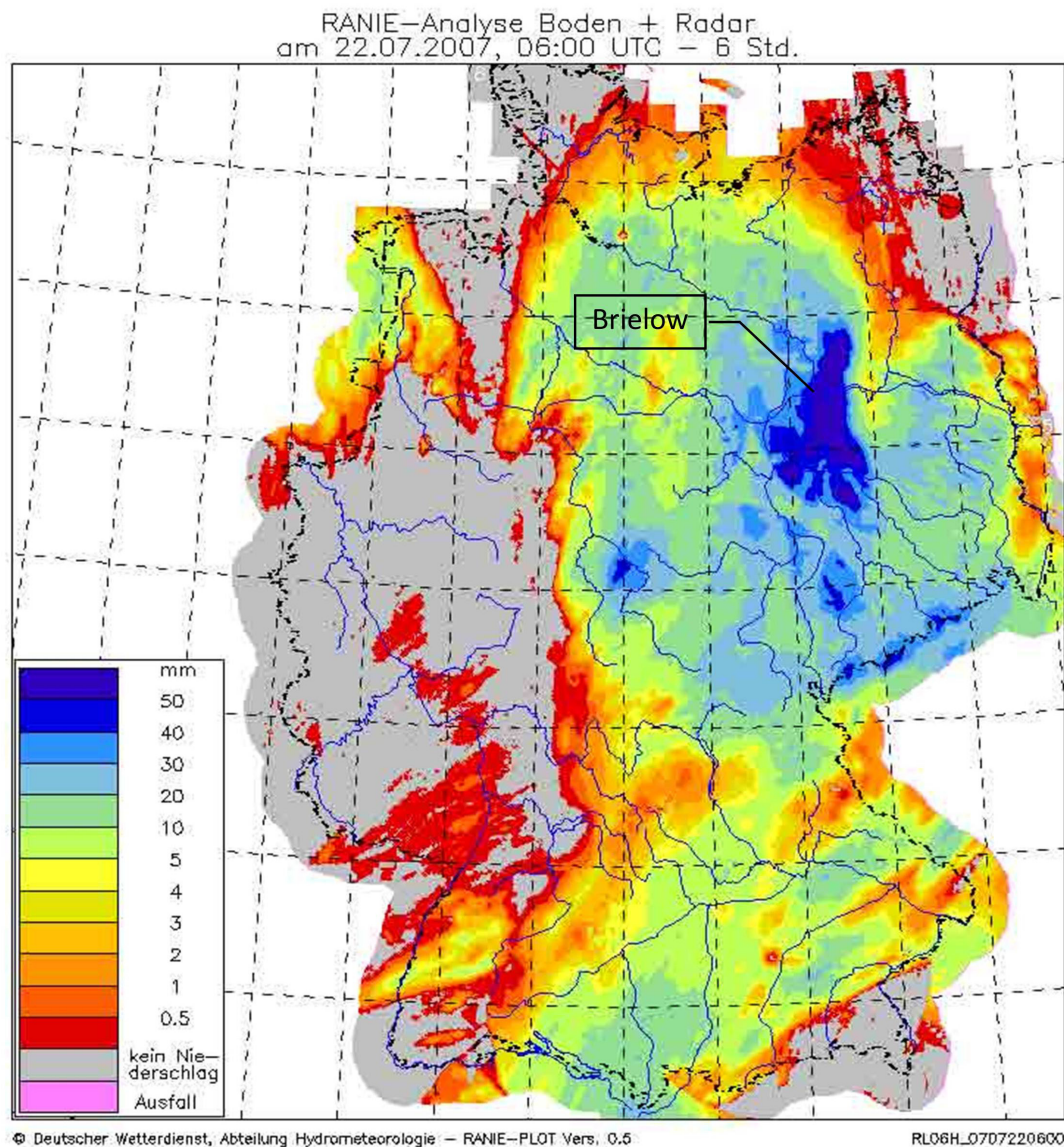


Abbildung 4: Starkregenzelle im Schadensgebiet

Figure 4: Rainstorm cell over the damage area

Damit wurde die Niederschlagsituation 2007 als eine wesentliche Ursache der Schäden identifiziert. Die Niederschlagsangaben dienten auch als Indiz der beständig aufgetretenen hohen Bodenfeuchte im Pflughorizont über den wenig wasserdurchlässigen Lehmschichten (Bt-Horizonten) der Fahlerden (Abb. 5a). Eine TDR-Messung wenige Tage nach einem Starkregen belegte das auch mit Werten nahe Sättigung.

Die ersten Starkregen mit Spitzenintensitäten von ca. 60 ... 70 mm/h in 10 Minuten nach einer 44-tägigen Frühjahrstrockenheit prägten das spätere Erosionsmuster im sich erst entwickelnden Mais (BBCH 14) vor (Tab. 1, 12. bis 29.5). Die RADOLAN-Daten,

die eine 5minütige Auswertung ermöglichen, zeigen ähnlich hohe Intensitäten. Die Infiltrationskapazität der Böden, die bei etwa 10 ... 15 mm/h liegt (Deumlich & Gödicke, 1988, Nietzsche et al., 2002), wurde damit weit überschritten. Mehrere nachfolgende Starkregen mit hohen Mengen und Intensitäten verstärkten das Schadensausmaß über die Sommermonate. Die Wetterstationswerte als auch die bodenangeeichten Niederschlagsradarmessungen des DWD belegen die vor Ort täglich gemessenen Werte (Tab. 1). Sie ermöglichen aufgrund der höheren Auflösung jedoch genauere Erosionsanalysen.

Tabelle 1: Berechnete Starkregenparameter der Regen der Station Paulinenaue (Sommermonate 2007 – oben) und des RADOLAN-Produkts „RZ“ des DWD für Erosionsereignisse

Table 1: Calculated rain parameter of the station Paulinenaue (summer months in 2007 – on top) and the RADOLAN product „RZ“ for erosion events

Datum	El <sub>30</sub> [N h <sup>-1</sup> ]	P [mm]	Energie	I <sub>30</sub> [mm min <sup>-1</sup> ]	I <sub>10</sub> [mm min <sup>-1</sup> ]	Begin [time]	Duration [min]	Angabe Landwirt [mm]
12.05.07	1,8	12,5	256,5	14,0	37,8	08:20	820	11
14.05.07	2,4	20,1	376,4	12,8	17,4	13:30	730	26
15.05.07	2,6	10,8	257,5	20,2	37,8	08:50	170	
28.05.07	3,2	23,0	444,9	14,2	22,8	16:50	710	54
29.05.07	18,5	34,7	869,7	42,6	60,6	16:10	100	
07.06.07	1,1	8,2	172,5	13,0	16,8	18:20	60	6
12.06.07	3,6	14,0	313,3	22,8	30,0	17:30	260	
15.06.07	9,3	18,7	496,9	37,4	58,8	15:30	30	6
16.06.07	24,9	49,3	1062,5	46,8	51,0	01:10	790	45
21.06.07	2,6	21,3	408,4	12,7	18,5	12:10	720	33
23.06.07	3,8	23,7	495,3	15,3	23,5	10:20	590	2
02.07.07	1,9	13,7	284,4	13,4	25,2	11:10	750	10
04.07.07	1,5	9,0	193,9	15,2	30,6	10:10	340	9
09.07.07	1,3	21,2	351,8	7,6	9,0	19:20	790	14
22.07.07	33,2	96,3	2196,2	30,2	51,6	01:40	750	31
08.08.07	,8	6,2	141,6	11,6	30,6	17:40	60	38
12.08.07	,8	6,6	138,7	11,2	25,2	05:30	210	5
21.08.07	5,5	32,3	641,7	17,1	25,2	04:10	420	51
03.09.07	1,0	16,0	263,5	7,9	12,5	01:50	1070	39
27.09.07	,6	10,1	164,6	7,6	9,0	19:20	290	19
28.09.07	1,6	16,5	310,8	10,2	12,0	16:30	230	15
Summe:	122	464,2	max:	46,8	60,6			414
08.05.07	1,2	18,6	361	6,6	25,2	00:45	1355	31
10.05.07	5,2	37,0	717	14,6	70,6	00:30	2535	13
15.05.07	1,2	11,6	231	10,2	43,4	03:00	765	24
26.05.07	6,1	23,7	636	19,1	95,6	14:45	205	47
27.05.07	15,3	42,9	1015	30,1	66,5	02:00	1135	25
28.05.07	1,1	22,6	421	5,3	10,8	20:40	560	
29.05.07	3,6	22,7	492	14,5	30,2	13:45	400	54
15.06.07	4,3	46,2	899	9,5	34,1	22:30	1130	45
21.06.07	1,5	28,8	554	5,3	43,4	09:35	720	33
21.07.07	14,0	70,6	1497	18,7	46,2	17:25	1395	51
07.08.07	19,1	45,1	1125	33,9	70,6	15:20	450	38
21.08.07	1,3	28,0	510	5,1	10,8	02:15	1130	28
22.08.07	0,9	13,3	252	7,0	26,8	04:35	260	5
23.08.07	6,2	21,7	529	23,3	52,1	11:20	445	20
24.08.07	1,2	12,4	245	9,4	34,1	01:05	170	18
03.09.07	7,3	38,0	742	19,8	70,6	00:10	1175	39
28.09.07	0,5	14,8	256	3,8	9,2	13:55	280	19
29.09.07	0,6	11,7	193	6,1	16,4	09:10	895	15
Summe:	90,6	513,7	max:	33,9	95,6			474

### 3. 2 Komplexität der Wassererosion und ihre Modellierung

Wassererosion wird durch standörtliche und klimatische Faktoren beeinflusst, wobei das Schadensausmaß je nach Konstellation aber bis zum Worst Case zunehmen kann. Im Fokus der Gefahrenabwehr bei Bodenerosion stehen bisher acker- und pflanzenbauliche Maßnahmen mit dem Ziel möglichst guter Bodenbedeckung (Duttmann et al., 2011). Damit soll das Ausmaß der Erosion in aller Regel begrenzt werden. Bei homogen geneigten Hängen im Bereich von 3-8% wird außerdem die Querbearbeitung empfohlen (Haider, 1995).

Im vorliegenden Fall wurde 2006 die Bearbeitungsrichtung auf Querbearbeitung umgestellt (Abb. 5b und 5c).

Die Effekte der Querbearbeitung werden nur in empirischen Gleichungen, speziell der (R)USLE-Modellfamilie (Wischmeier & Smith, 1978, Renard et al., 1997, Auerswald, 1992), berücksichtigt. Neben der Hangneigung werden dabei zusätzlich die Rauigkeit und die Abweichung von exakter Konturlinienbearbeitung als Kriterien einbezogen. Physikalisch basierte Prozessmodelle sind diesbezüglich auf genaue Daten der Geländeoberfläche angewiesen, um den Abflussprozess abzubilden. Das DGM25 ist für diesen Zweck unzureichend.

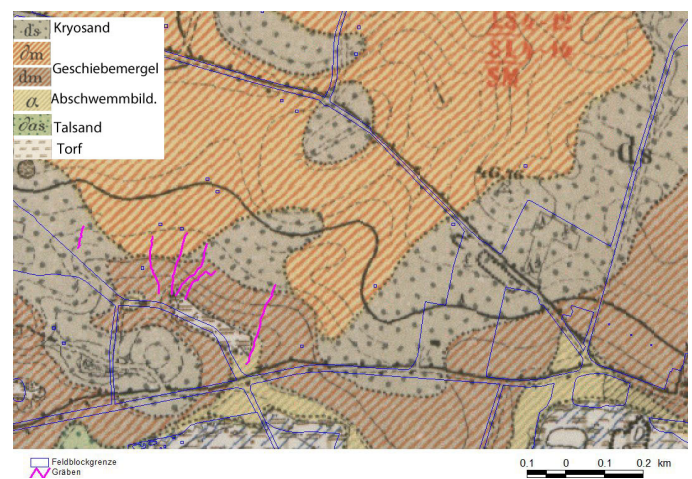


Abb. 5a. Geologische Karte GK 25 (Blatt 3541, Brandenburg, Kgl. Preuss. Geolog. Landesanstalt 1891, Lieferung 54, Ausschnitt, ergänzt, mit Feldblöcken 2007); im Schadensareal vorherrschend Grundmoräne mit verschiedenen mächtigen Decksanden über Geschiebelehm und Geschiebemergel (Lehmsand - LS 2-12 dm über Sandlehm – SL 4-16 dm über Sandmergel – SM) und diluvialer Sand in Schwemmfächern und Rinnen (Sand - S 20 dm)

Fig. 5a: Geological map GK25, (Sheet 3541, Brandenburg, Kgl. Preuss. Geolog. Landesanstalt 1891, delivery 54, part, compl., with field blocks 2007), in the damage area prevailing ground moraine with cover sand of various thickness above glacial loam and glacial marl and diluvial sand as fens and within rills





Abb. 5b: Landnutzung im Luftbild 2002  
Fig. 5b: Aerial view of the landuse in 2002

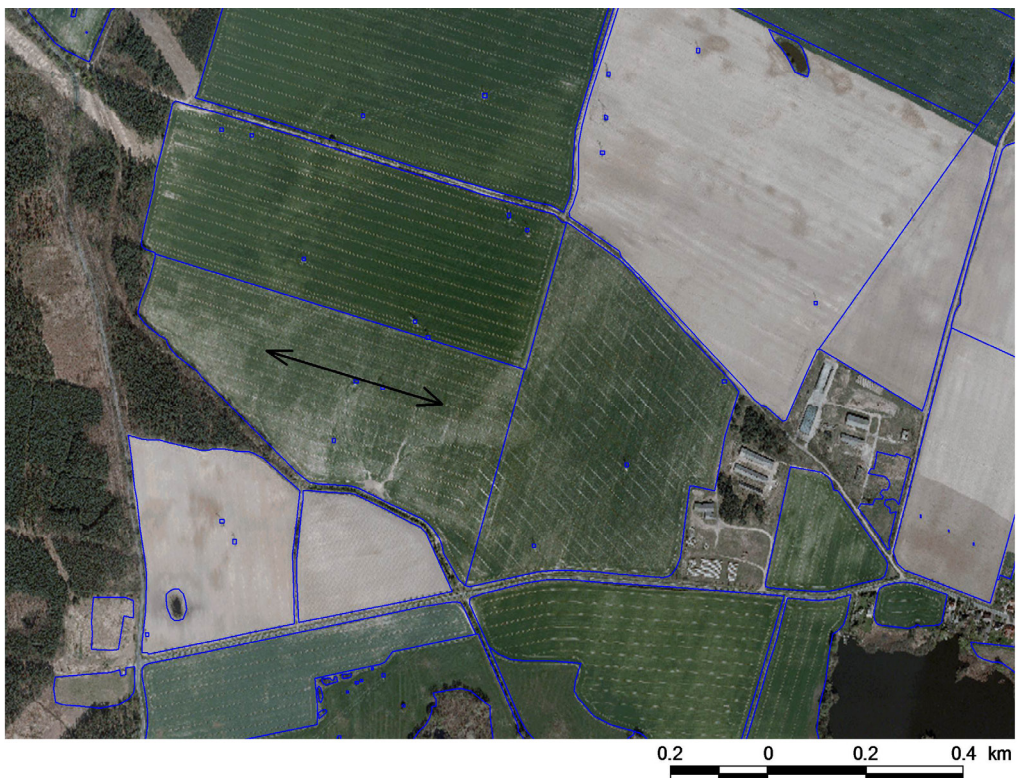


Abb. 5c: Landnutzung im Luftbild 2006  
Fig. 5c: Aerial view of the landuse in 2006

### 3.2.1 Erosionsmodellierung

Da Modelle Abbild des zugrundeliegenden Wissens und der vereinfachenden Darstellung realer Objekte sind, werden sie außerhalb von Prognosen und Planungen auch zur Analyse nach Schadensfällen genutzt. Damit sollen retrospektiv bestimmte Ereignisse nachgestellt werden, um Ursachen des Systemverhaltens aufzuklären und Schlüsse für angemessene Reaktionen (einzuleitende Schutzmaßnahmen) zu ziehen. Die erzielbaren Resultate hängen dabei wesentlich von der Datenqualität und Anpassungen an die regionalen Bedingungen ab.

Die gegenwärtig besten Daten der Geländeoberflächen liefern hochgenaue digitale Geländemodelle (DGM1 bzw. DGM2) aus Airborne Laserscanning (ALS, flugzeugbasierte Entfernungsmessung). Das bisher genutzte DGM25 genügt modernen Anforderungen des Katastrophenschutzes zur Hochwasserabwehr nicht mehr. Es entstand aus Digitalisierungen von Kartenunterlagen (TK10, verbessert durch stereofotogrammetrische Methoden) ausgangs des letzten Jahrhunderts und bildete die Geländeoberfläche nur mit  $\pm 2$  m Genauigkeit ab. Zur Projektierung des Hochwasserschutzes sind aber im Flachland verbesserte Genauigkeiten von  $< 0,3$  m erforderlich. Die hohe Punktdichte des ALS ermöglicht  $\pm 0,15$  m Höhengenaugigkeit (Katzur & Wedel, 2010). Durch die landesweite Befliegung im Bundesland Brandenburg sind damit auch hochgenaue Daten zur Erosionsbeurteilung verfügbar.

Fließwege konnten in stärker reliefierten Arealen bisher bereits aus Karten (TK10 und kleinmaßstäbiger) bzw. daraus entstandenen digitalen Kartenprodukten gut identifiziert werden. Ihre Bestimmung im flacheren Gelände ist jedoch schwierig und wird erst mit dem DGM1/DGM2 möglich. Damit sind die Skalen der Grundlagen der Erosionsmodellierung (sie beruhen auf Ergebnissen von Regensimulationen, Messungen in Parzellen und Kleinsteingebieten sowie Laboruntersuchungen (Schmidt, 1996, Auerswald, 1993; Flanagan & Nearing, 1995)) und der digitalen Geländemodelle vergleichbar. Das wird deutlich, wenn man die Modellergebnisse für das Schadensareal für unterschiedliche Rasterweiten miteinander vergleicht. Mit zunehmender Rasterweite sind die wassererosionsbedingten Bodenabträge

des modellierten 100jährigen Einzelereignisses im Bereich linearer Erosionsformen nicht mehr präsent (Abb. 3, Abb. 6, Tab. 2, Zelle 1 bis 3). Bei flächenhaften Erosionsprozessen (Zelle 4) sind die Ergebnisse annähernd gleich.

Tabelle 2: Bodenabträge (modelliert) für verschiedene Skalen bezogen auf ein Gridelement aus Abb. 6 (Koordinaten ETRS89)

Table 2: Soil losses (modeled) for different scales related to a grid element from fig 6 (coord. ETRS89)

DGM	BA in t/ha							
	Zelle1		Zelle 2		Zelle 3		Zelle 4	
	3333359/5817709	3333386/5817661	3333418/5817687	3333465/5817660				
1	0,7	100%	8,3	100%	15,3	100%	0,05	100%
2	0,5	70%	5	61%	9,3	61%	0,02	51%
5	0,5	69%	1,7	21%	4,2	27%	0,23	502%
10	0,003	0%	0,9	12%	3,2	21%	0,06	127%
25	0,043	6%	0,009	0,1%	0,12	0,8%	0,12	271%

Das DGM25 scheidet demzufolge als Material zur Aufklärung kleinräumiger Erosionsphänomene aus. Selbst die Resultate des DGM10 und auch des DGM5 spiegeln das Erosionsverhalten im vorliegenden Fall skalenbedingt nur abgeschwächt wieder.

Während in vielen Anwendungsfällen durchaus achtbare Ergebnisse auch mit den größeren Rasterweiten erzielt worden sind (Behrendt et al., 1998; Behrendt & Dannowski, 2005), sind sie für Mengenberechnungen kleinskalig relevanter linearer Erosionsformen ungeeignet. Allerdings entscheiden das Ziel, die Skala und die Nutzungsbeschränkung der Modelle über Anwendung und Ergebnisqualität. Je größer dabei die Bezugsebene wird, desto mehr verschwindet bekanntermaßen der Informationsanteil kleinskaliger Phänomene, u.a. der Hangneigung (v. Werner, 1995, Kuo et al., 1999, Kuhnert, 2009).

Werden z.B. flächenhafte Analysen der Berechnungsergebnisse der DGM25 ... DGM1 vorgenommen, sind die Differenzen zwischen ihnen im flachen Areal nicht mehr so groß. Für 2 Feldblöcke mit ca. 69 und 141 ha liegen die Differenzen der mittleren potentiellen Bodenabträge des genauesten und des größten Rasters bei etwa dem Zweifachen. Die Resultate der anderen Raster ordnen sich dazwischen ein (Tab.3).

Tabelle 3. Mittlere potentielle Bodenabträge in Feldblöcken

Table 3: Middle potential of soil losses in field blocks

DGM	Feldblock	Fläche	Mittel	Spanne	s	Median
		ha				
25	a	70,9	0,75	3,1	0,68	0,55
	b	143	0,99	5,1	0,82	0,76
10	a	69,5	0,7	5,1	0,76	0,46
	b	141	0,88	6,3	0,86	0,62
5	a	68,8	0,9	13,1	1,24	0,42
	b	140,8	1	19,9	1,3	0,59
2	a	68,7	1,2	43,0	2,89	0,34
	b	140,6	1,4	79,3	2,91	0,52
1	a	68,7	1,4	99,0	4,62	0,25
	b	140,6	2,1	199,3	7,39	0,43

## 3.2.2 Großmaßstäbige Erosionsmodellierung

Wie verhält sich das Erosionsmodell EROSION-3D in seiner „Entwicklungsskala“?

Die modellgestützte Analyse der einzelnen Gräben im Erosionssystem sollte darüber Aufschluss geben. Da das Modell „versucht“, den Abfluss „hydrologisch korrekt“ zu simulieren, werden „Sinks“ und die ebenso betrachteten fast ebenen Flächen zuvor mit einem „Füllalgorithmus“ behandelt, d.h. die aus dem DGM1 vorgegebene Höhe entsprechend geändert. Diese Änderung bewirkt in den Berechnungen, dass z.B. ein Durchfluss durch das eigentliche Akkumulationsgebiet (Sedimentationsareal) entsteht. Aus diesem Grund, wurden die Modellergebnisse für die jeweiligen Grabenenden erfasst, um sie mit den grob vermessenen Ausraumvolumina zu vergleichen (Abb. 7, Tab. 4).

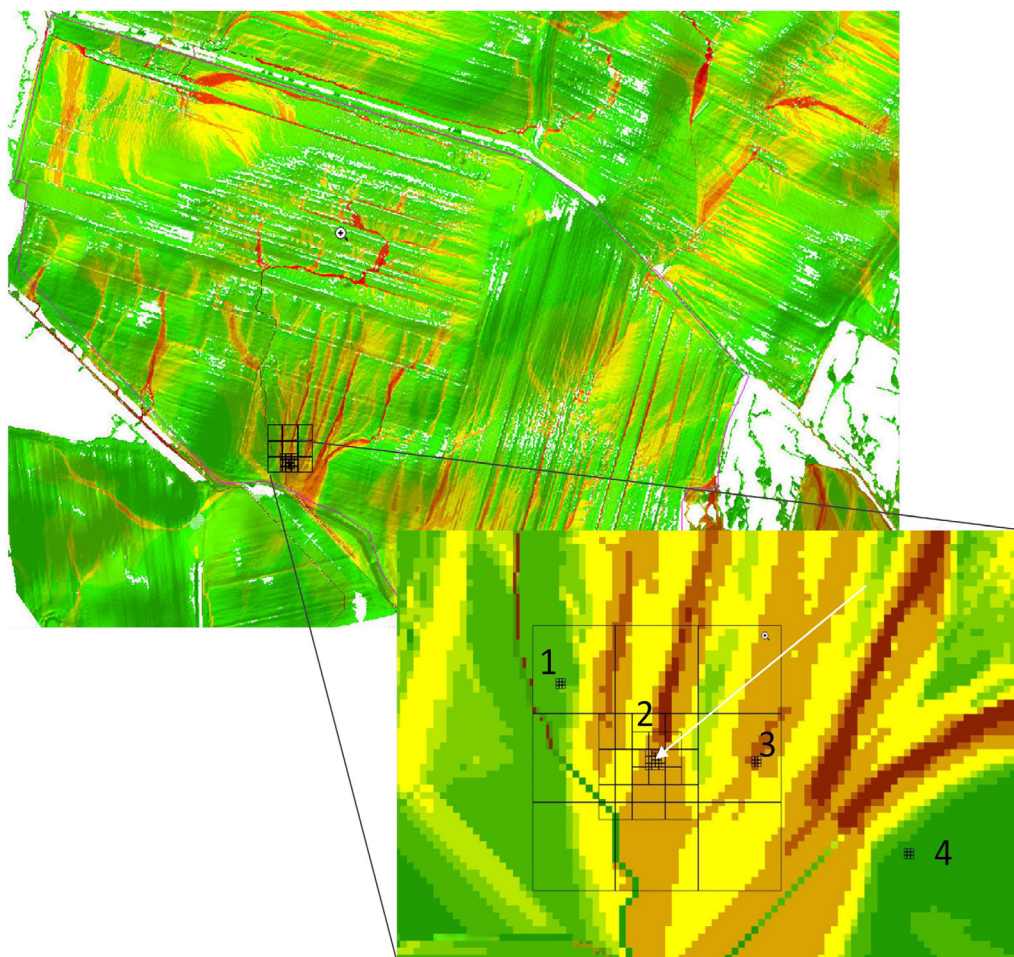


Abbildung 6: Bodenabträge (modelliert) für verschiedene Skalen bezogen auf ein Gridelement (1m ... 25m; Koord. ETRS89)

Figure 6: Soil losses (modeled) for different scales related to a grid element (1m ... 25m; coord. ETRS89)

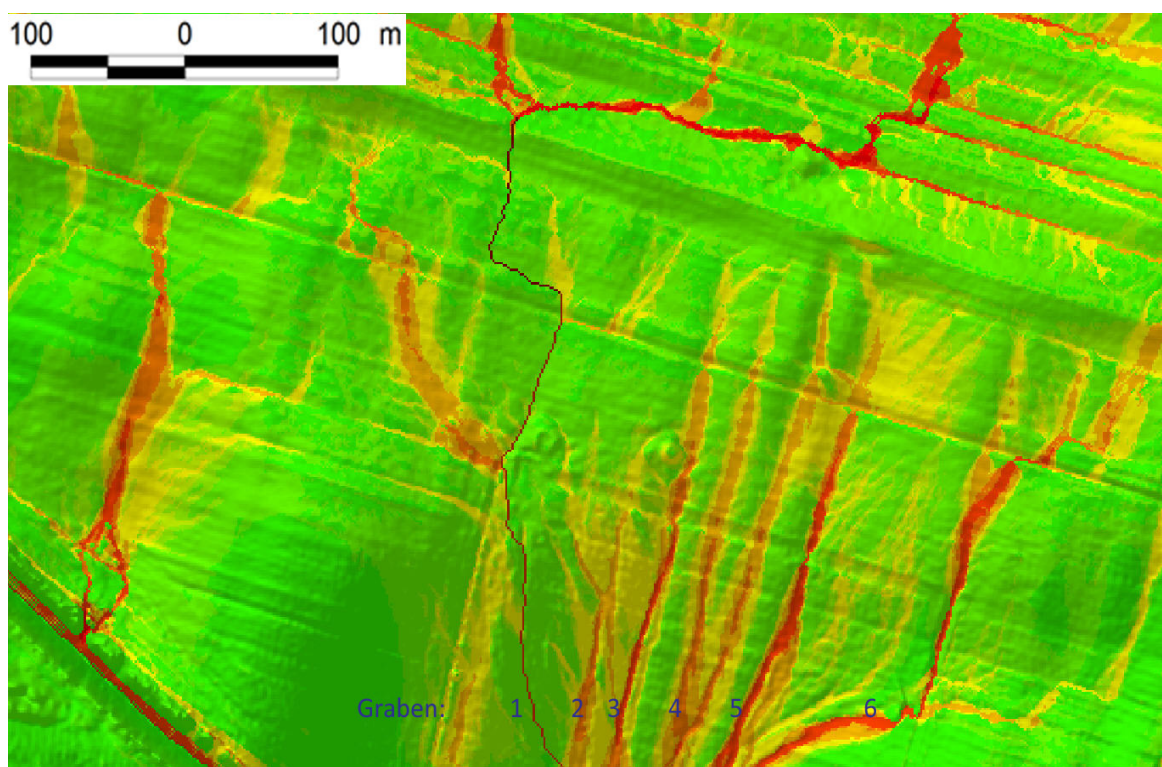


Abbildung 7: Lage der analysierten Erosionsgräben

Figure 7: Situation of the analyzed erosion gullies

Tabelle 4: Resultate der Erosionssimulation im Bereich des zu verbauenden Grabensystems (Mais)

Table 4: Results of the erosion simulation in the area of the gully system to be obstructed (maize)

Graben	Sedimentmenge in [t]	EZG- Fläche in [m <sup>2</sup> ]	Bodenabtra- g in t/ha]
1	485	118962	40,8
2	0,6 1,1 1,85	760 1209 1884	7,7 9,2 9,8
3	11,5	4509	25
4	5,17	3350	15,4
5	18	6267	28,8
6	44	14900	29,5
Summe	567	151841	37,4

Etwa 570 t berechnete Sedimentmenge (Simulation eines 100jährigen Ereignisses) aus dem Bereich des Grabensystems entspricht bei einer Dichte von  $1,4 \text{ g/cm}^3$  ca.  $400 \text{ m}^3$  Sedimentvolumen. Damit liegt die berechnete Menge in der richtigen Größenordnung, aber unter dem tatsächlichen Austrag. Sie befindet sich aber für das stärkste Ereignis am

22.7.2007 durchaus im Bereich des Möglichen (Tab. 1). Die zeitlich davor und danach gelegenen 6 größten Ereignisse mit ähnlich hohen Niederschlagsintensitäten haben in dem bereits vom Ereignis 28./29.5.2007 vorgeprägten Erosionssystem zu den weiteren ca.  $400 \text{ m}^3$  Sedimentvolumen bei stetig fortschreitender Erosion geführt. Diese Menge entspricht annähernd dem am Ende der Erosionsperiode analysierten Ausraumvolumen im Grabensystem, das zur Wiederherrichtung der Geländeoberfläche mit ca.  $800 \text{ m}^3$  berechnet wurde. Die zwischen den Abflussrinnen und -gräben befindlichen Flächen weisen für das simulierte Einzelereignis Bodenabträge bis zu  $0,3 \text{ t/ha}$  auf, die sich über alle Ereignisse auf bis zu  $2,1 \text{ t/ha}$ , eine unter Mais durchaus übliche flächenhafte Abtragsmenge summieren.

Das Modell im 1m-Raster ergibt im Anwendungsfall nutzbare Resultate, die zumindest der Größenordnung der Erosionsereignisse entsprechen. Das Abbild der Schadensfläche zeigt im 1m-Raster nahezu fotorealistisch den Verlauf der Erosion (Abb. 3). Zunächst entsteht geringer sich am

Mikrorelief orientierender verästelter sich in der Folge konzentrierender Abfluss/Abtrag entlang des Gefälles, modifiziert durch die im DGM1 repräsentierten Fahrspuren auf der höher gelegenen Fläche. Aus dieser mit Raps bestellten Fläche tritt Oberflächenabfluß in die Maisfläche ein, und fließt in regelhaft angeordneten Tiefenlinien zur Erosionsbasis. Zwischenakkumulationen (Schwemmfächer) und Erosionsgräben sind, wie in der Realität auch im Modellabbild visualisiert, sichtbar.

Die Ursachen dieser starken Erosion schienen erklärlich: mehrere starke Niederschläge mit zum Teil geringer Wiederkehrwahrscheinlichkeit, mittel erodierbarer Boden und der als stark erosionsgefährdet betrachtete Mais (Voß et al., 2010, Frielinghaus et al., 2004). Es blieb die Frage zu klären, womit sind die regelhaften Erosionsmuster im unteren Schlagteil zu erklären.

Deshalb wurden historische Quellen (Preußisches Urmesstischblatt, Gemarkungskarte, Alliiertenluftbilder (1944, 1945), Russische Befliegung 1953, Luftbilder zwischen 1992 und 2007) gesichtet.

Erst nach der Ernte des Mais wurden alle Schäden sichtbar. Bei günstigen Lichtverhältnissen wurden darüber hinaus entlang der Fahrspuren regelhafte Strukturen als Wölbungen erkannt. Sie wurden zunächst auf evtl. früher existierende Schlaggrenzen zurückgeführt. Recherchen ergaben als weitere Möglichkeit – Wölbackerrelikte. Belege zu Wölbackern fanden sich für die Prignitz unter Wald (Hierold & Nagel, 2000, Wulf, 2000). Zur Flur und ihrer Nutzung in Mitteleuropa waren Forschungen bis in die 70er Jahre des letzten Jh. sehr verbreitet, es gab Vorschläge wie Archäologie, Bodenkunde, Paläo-Ethno-Botanik und Anthropogeografie eng zusammen arbeiten sollte (Jankuhn, 1979). Denecke (1979) beschreibt die Entstehung der Wölbacker.

Die auch Langstreifenfelder genannten Wölbacker waren um Radewege verbreitet, wie die Gemarkungskarte von ca. 1841 belegt. Da dann im Zuge der Industrialisierung und aufgrund wachsenden Bevölkerungsdrucks diese Nutzungsform zugunsten des Ebenbaus aufgegeben wurde, Flächenzusammenlegungen (Flurneuordnung) stattfanden bzw. marginale Ackerstandorte wüst fielen, zu Grünland oder Wald umgewidmet wurden, verschwanden Wölbacker mehr und mehr aus der

Landschaft und dem Gedächtnis. Die Bewirtschaftung großer Flächen im Ebenbau mit entsprechender Technik führte meist auch zu ihrer schnellen Überprägung und zum Verschwinden von den Äckern.

Die regelhaft unter jetziger Waldnutzung gelegenen noch gut sichtbaren Wölbungen in der Nachbarschaft zum Schadensareal, bilden deutlich die früher anders geartete Flurnutzung als Wölbackerfluren ab, eine in Mitteleuropa fast überall verbreitete Nutzung (Jannssen, 1979, Fenton, 1951, de Bakker & Marsman, 1982).

### 3.3 Schadensursachen

Die Änderung der Bearbeitungsrichtung ohne Beachtung früherer Bewirtschaftung und das Zusammentreffen mit extremen Starkregen sowie den oben bereits angeführten Erosionsursachen führten im Beispielfall zu dem enormen Schadensausmaß.

Allein die Modellrechnungen und die angetroffenen aktuellen Bedingungen reichen demzufolge ohne Berücksichtigung früherer Landnutzungen nicht zur Erklärung der immensen Erosionsfrachten.

### 3.4 Historische und aktuelle Kartierungen

Erst die hochgenauen DGM2/DGM1 bildeten die Oberfläche adäquat so ab, dass die linearen Strukturen ersichtlich und die Horizontalwölbung widergespiegelt wurden. Diese auf der Geländeoberfläche vorhandenen regelhaft wiederkehrenden Strukturen waren zuvor weder mit dem Auge noch vom Flugzeug aus ausreichend identifizierbar. Die Höhendifferenzen von Rücken und Furche der Wölbungen liegen unter Wald bei ca. 20 cm, im Acker noch bei ca. 10 cm. Damit bildet jede Wölbackermulde ein eigenes Kleinzugsgebiet.

Die Firstlinien der Wölbacker sind in den älteren handgezeichneten Karten und ersten Vermessungsplänen dargestellt (LGB, 2009 S. 81). Spätere Darstellungen in den Gemarkungskarten (zumeist vor der Zusammenlegung der Fluren infolge von Flurbereinigungsmaßnahmen) zeigen diese auf engem Raum wechselnden Strukturen (Abb. 8). Im DGM1 sind sie in ihrer vollen Ausdehnung in unterschiedlichem Erhaltungszustand (unter Wald gut, im Acker schwächer) sichtbar (Abb. 9).

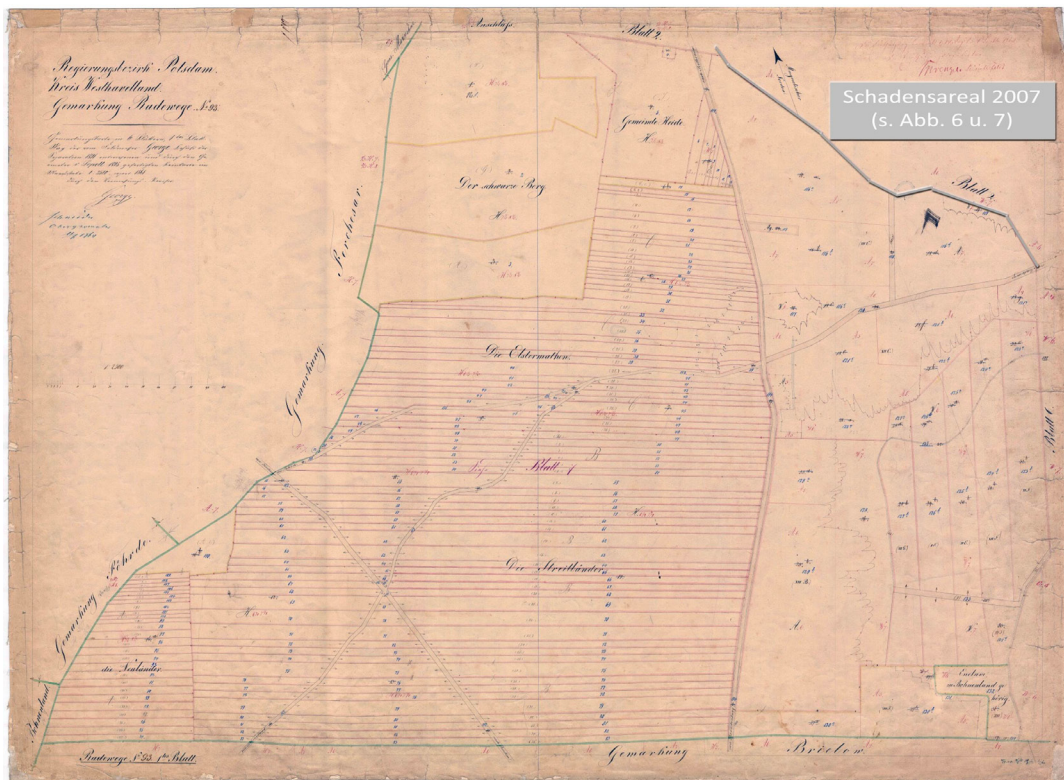


Abbildung 8: Gemarkungsurkarte 1845, rogiert 1861 (Blatt 7) (Katasteramt Teltow)  
 Figure 8: Local subdistrict map from 1845, renewed in 1861 (sheet 7) (cadastral office of Teltow)

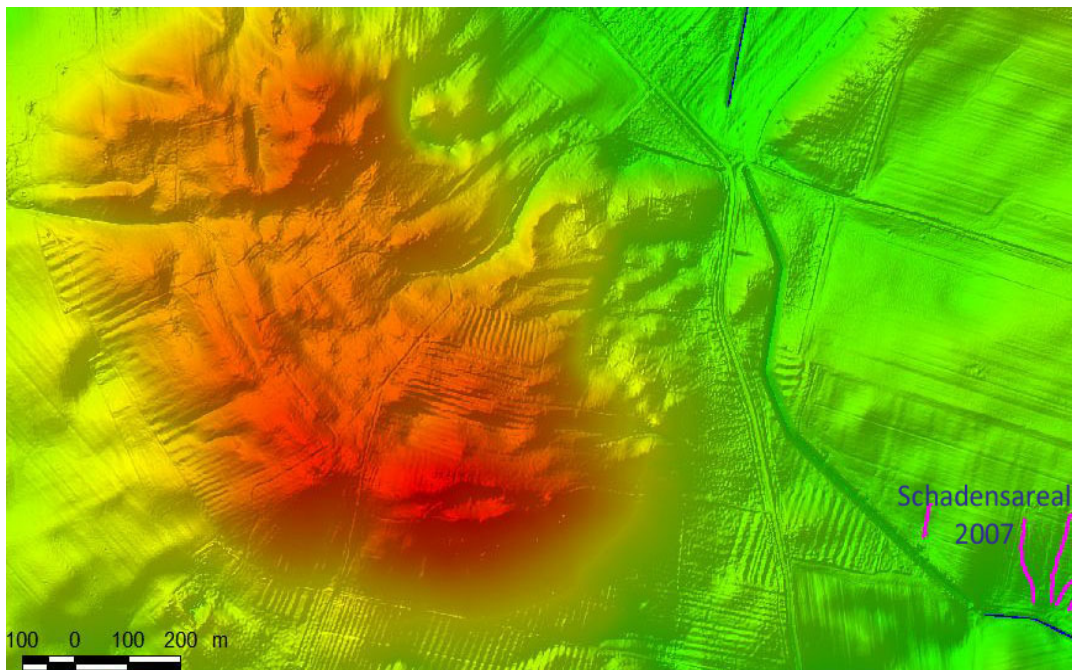


Abbildung 9: Wölbackerrelikte im DGM1  
 Figure 9: Ridge and furrow relicts in DEM1

Während unter heutigem Wald diese Relikte früherer landwirtschaftlicher Nutzung gut zu identifizieren sind, hat der Ebenbau zur Einebnung geführt, die durch quer/schräg zu den Wölbäckern verlaufende Bearbeitungsrichtungen inzwischen zu ihrem weitest gehenden Verschwinden geführt hat. In vielen Fällen sind diese Kleinreliefformen (auch ehem. Wege, Feldgrenzen) noch vorhanden und führen zur Modifikation bzw. Konzentration des Abflusses. Aus anderen Untersuchungen zur Querbearbeitung ist bekannt, wie im Falle von Kartoffeln (Bifänge), dass bei Niederschlägen gravierende Schäden aufgrund des kaskadierenden Durchbruchs der Dämme eintreten können, während hangabwärts gerichtete Reihen nur geringe Schäden aufweisen (Nietzsche et al., 2002, Hiller, 2007 S. 18). In Barsch et al., 1998 wird insbesondere auf die Bedeutung der Hangmulden für die Tiefenlinienerosion hingewiesen.

#### 4 Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse der ABAG-Berechnungen ermöglichen eine dem Stand des Wissens genügende Übersicht über die erosionsgefährdeten Gebiete des Landes bei mittlerem Erosionsverhalten. Für die Auswertung von Einzelereignissen sind sie nicht verwendbar (Wischmeier, 1976).

Die üblichen Erklärungsmuster können unter dem Einfluss der speziellen Landnutzungsgeschichte nicht die gesuchte Begründung für die gravierenden Erosionsschäden im relativ flachen Beispielsgebiet erbringen. Erst die Anwendung der hochaufgelösten Daten ergibt das annähernd realistische Resultat, was durch die gemessenen als auch die berechneten Abtragsmengen bestätigt wird.

Ursachen der starken Erosion waren das Zusammentreffen mehrerer aufeinanderfolgender starker Niederschläge mit zum Teil geringer Wiederkehrwahrscheinlichkeit, erodierbarer Boden, stark erosionsgefährdeter Mais, konventionelle Bodenbewirtschaftung und eine bei diesen Bedingungen wirkungslose Querbearbeitung. Letztere verschärfte die Erosion aufgrund der unbeachtet gebliebenen linearen Strukturen (Wölbäcker), die anfänglich bei Niederschlägen das Wasser oberflächlich anstauten,

das dann aufgrund seines Durchbrechens in der Folge zu tiefen Gräben führte.

Mit den hochaufgelösten DGM1/DGM2 stehen Instrumente zur Verfügung, die Simulationsergebnisse deutlich verbessern. Die GIS-technischen Bedingungen und vorhandene Modellstrategien erschweren zurzeit noch ihre Verwendung (Kosten, Zeit der Datenaufbereitung und Rechenzeit).

Daraus ergibt sich die Bedeutung aggregierter Geländeoberflächendaten für die verschiedensten Fragestellungen auf kleiner, mittlerer als auch auf großer Skala.

Im Bereich der Erosionsprognose stehen zwei wichtige Eingangsdaten bereits in hoher Auflösung digital zur Verfügung, Daten zur Topographie (DEM1/DEM2) und zum Niederschlag (RADOLAN-RY). Auch die Nutzungsinformationen sind aus InVeKoS (CAP Farm Advisory System (FAS)) zugänglich. In dieser Skala gegenwärtig nicht adäquat verfügbar sind flächendeckende detaillierte Bodeninformationen. Dabei kann bei landwirtschaftlichen Böden noch auf Daten der Finanzverwaltung (ALK-Folie42, Bodenschätzung im Maßstab 1:500 ... 1:5.000) zurückgegriffen werden. Pedotransferfunktionen sind erforderlich, um geeignete Modelleingangsdaten daraus zu erarbeiten. Frede et al. (2002) hatten die Notwendigkeit qualitativ hochwertiger Bodeninformationen als Herausforderung für die Bodenkunde der nächsten Jahre genannt. Erste Lösungen auf der Feldskala existieren zumindest mit Georadar (Daten elektromagnetischer Messungen, Mc Neill, 1980; Lück et al., 2000, 2002; Domsch et al., 2004), die kombiniert mit der Bodenschätzung zur verbesserten räumlichen Lagegenauigkeit der Bodendaten beitragen.

Während mit dem DGM1/DGM2 brauchbare Bodenabtragsdaten im Ergebnis zu erzielen sind, ist das DGM25 als Basismaterial zur Aufklärung kleinräumiger Erosionsphänomene nicht geeignet. Seine Anwendung wird sich in Zukunft auf den mittleren Maßstab und einzugsgebietsbezogene Erosionsprognosen konzentrieren. Richten diese Resultate den Verdacht auf mögliche Bodenerosion, können mit den verfeinerten Methoden detaillierte Aussagen getroffen werden.

Durch Visualisierungstechniken werden interessante

Sichten möglich, die nahezu fotorealistische Abbilder der abgelaufenen Erosionsprozesse erlauben (s.a. geo.top.art, 2010).

Der Einfluss bisweilen überprägter, historischer Landnutzungsstrukturen ist bei Planungen zu berücksichtigen (insbesondere bei Flurneuordnungen). Neben diesen Strukturen, die den Prozess des Abflusses nicht verändern, aber modifizieren, sind auch die alten Wegenetze, Schlag- und Nutzungsgrenzen von erheblicher Bedeutung.

Erst die komplexe Nutzung vieler verfügbarer Informationen (historischer und aktueller Boden- und Geländekarten, Luftbilder, Ortsbesichtigung, Datenspeicher), ihre Kopplung in Modellen und Überlagerungen von Karten- und Bildmaterial im GIS, gewährleisten eine näherungsweise Aufklärung in speziellen Erosionsfällen.

Die hochgenauen DGM1/DGM2 ermöglichen Modellierungen auf der Skala der Entwicklung physikalisch basierter Prozessmodell. Damit sind auf dieser Ebene realistische Modellergebnisse zu erwarten. Die gegenwärtig noch aufwändige Nutzung (Datenvorbereitung, Rechenzeit) wird bei der weiteren technologischen Entwicklung (Rechenkapazität, Datenbank) kaum noch eine Rolle spielen. Augenmerk ist besonders auf die Datenqualität zu richten. Historische Dokumente sind dabei zu berücksichtigen und digital verfügbar zu halten.

## Literatur

- ad-hoc AG Boden, 2005. Bodenkundliche Kartieranleitung 5. Hannover, 438 S.
- Auerswald, K. 1992. Verfeinerte Bewertung von Erosionsschutzmaßnahmen unter Deutschen Anbaubedingungen mit dem P-Faktor der Allgemeinen Bodenabtragungsgleichung (ABAG). Z. f. Kulturtechnik und Landentwicklung, Verl. Paul Parey, Berlin u. Hamburg, 33, 137-144
- Auerswald, K. 1993. Bodeneigenschaften und Bodenerosion. Gebr. Borntraeger, Berlin, Stuttgart, Bd. 8, 208 S.
- Barsch, D., Schukraft, G. & A. Schulte 1998. Der Eintrag von Bodenerosionsprodukten in die Gewässer und seine Reduzierung – das Geländeexperiment „Langenzell“. In: Richter, G. (Hrsg.): Bodenerosion: Analyse eines Umweltproblems. Wiss. Buchges., Darmstadt, 264 S.
- Behrendt, H. & R. Dannowski 2005. Nutrients and Heavy Metals in the Odra River System: Emissions from Point and Diffuse Sources, their Loads, and Scenario Calculations on Possible Changes. Berlin, Weißensee Verl., 353 S.
- Behrendt, H., Huber, P., Opitz, D., Schmoll, O., Scholz, G. & R. Uebe 1998. Nährstoffbilanzierung der Flußgebiete Deutschlands. Berlin, Umweltbundesamt, UBA-Texte 75/99, 288 S.
- BGR (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, 1995). Ergebnisse der Aufbereitung von Daten der Mittelmaßstäbigen Landwirtschaftlichen Standortkartierung (MMK) der ehemaligen DDR für länderübergreifenden Bodenschutz. Hannover, Berlin,
- Böhm, C., Kiesel, J., Deumlich, D. & J. Thiery 2009. GIS-Based Extrapolation of Medium Scale Agricultural Site Mapping in North-Eastern Germany. J. Plant Nutr. and Soil Sci., 172, 467 - 476
- Bork, H.-R., H. Bork, C. Dalchow, B. Faust, H.-P. Pierr & Th. Schatz 1998. Landschaftsentwicklung in Mitteleuropa. Wirkungen des Menschen auf Landschaften. Klett-Perthes, Gotha, 328 S.
- Bork, H.-R., Dalchow, C. & Mo. Frielinghaus 1999. Bodenentwicklung, Bodenzerstörung und Schutzbedürftigkeit von Böden in der Vergangenheit. In: Buchwald, K. & W. Engelhardt (Hrsg.) Umweltschutz – Grundlagen und Praxis, Bonn, Economica Verl., Bd. 4, Schutz des Bodens, 16 -28
- De Bakker, H. & B. A. Marsman 1982. Kruininge percelen. Boor en Spade 20, 9 – 37
- Denecke, D. 1979. Zur Terminologie ur- und frühgeschichtlicher Flurparzellierungen und Flurbegrenzungen sowie im Gelände ausgeprägter Flurrelikte. In: Beck, H., Denecke, D. & H. Jankuhn.: Untersuchungen zur eisenzeitl. u. frühmittelalterl. Flur in Mitteleuropa u. ihrer Nutzung. Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen: 410 - 441



- Deumlich, D. & K. Gödicke 1989. Untersuchungen zu Schwellenwerten erosionsauslösender Niederschläge im Jungmoränengebiet der DDR. - Arch. Acker- Pflanzenb. Bodenkd., Berlin 33, 11, 709 – 716
- Deumlich, D. 1999. Erosive Niederschläge und ihre Eintrittswahrscheinlichkeit im Nordosten Deutschlands. Meteorolog. Zschr., 8, 155-161.
- Deumlich, D. 2012. Hangneigung und Wassererosionsgefahr in Brandenburg. <http://geodaten.zalf.de/website/bswa/viewer.htm>
- DIN 19708 2005. Bodenbeschaffenheit - Ermittlung der Erosionsgefährdung von Böden durch Wasser mit Hilfe der ABAG. Normenausschuß Wasserwesen im DIN. Beuth Verl., Berlin.
- Domsch, H. & A. Giebel 2004. Estimation of soil textural features from soil conductivity recorded using the EM38. Precision Agriculture, 5, 389-409
- Duttman, R., Bach, M. & A. Herzog 2011. Bodenerosion durch Wasser. In Blume, H.-P., Horn, R und S.T. Bruhn (Hrsg.): Handbuch des Bodenschutzes. 4. Aufl. WILEY-VCH, Weinheim, 199-215
- DVWK 1996. Bodenerosion durch Wasser. Kartieranleitung zur Erfassung aktueller Erosionsformen DVWK. (Merkblätter zur Wasserwirtschaft Edition). Bonn, DVWK - Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V., 239, p. 62.
- ESRI 2006. ArcView 3.2, ArcInfo 9.3. Redlands, California, USA. [www.esri.com/software](http://www.esri.com/software)
- Fenton, E. W. 1951. Vegetation and agricultural activities as shown by aerial photographs. Scottish Geographical Journal, 67, 2, 105 — 109
- Flanagan, D. C. & M. A. Nearing (eds.) 1995. USDA Water Erosion Prediction Project hillslope and watershed model documentation. NSERL Report No. 10. West Lafayette, Ind., USDA □ ARS National Soil Erosion Research Laboratory.
- Fohrer, N., Mollenhauer, K. & Th. Scholten 2003. Bodenerosion In: Nationalatlas Bundesrepublik Deutschland / Institut für Länderkunde, Leipzig (Hrsg.). - Heidelberg : Spektrum Akad. Verl., 106 - 109
- Frede, H.G., Bach, M., Fohrer, N. & L. Breuer 2002. Interdisciplinary modeling and the significance of soil functions. J. of Plant Nutrition and Soil Science. Vol. 165, 4, 460–467.
- Frielinghaus, M. (Autorenkoll.) 2002. Beiträge zum Bodenschutz in Mecklenburg-Vorpommern. Bodenerosion. LUNG, Schwerin, 2002, 82 S.
- Frielinghaus, M., Winnige, B., Deumlich, D. & R. Kretzschmar. 2004. Schutz vor Wassererosion. In: Blume, H.-P. (Ed.): Handbuch des Bodenschutzes. 3. Auflage, ecomed Verlagsgesellschaft, Landsberg am Lech, 684 – 695.
- geo.top.art 2010. Kunstgenie der Oberfläche. LGB Brandenburg, 31 Abb.
- Haider, J. 1995. Prognose von Bodenerosion Workshop. Hrsg.: Landesanstalt für Umweltschutz, Karlsruhe
- Hard, G. 1970. Exzessive Bodenerosion um und nach 1800. In: Erdkunde, Bd. 24, 290-308
- Hempel, L. (Tecklenburg) 1954. Flurzerstörung und Bodenerosion in früheren Jahrhunderten. Zschr. f. Agrargesch. u. Agrarsoziologie 2, 114-122
- Hierold, W. & D. Nagel 2000. Die Wölbäcker von Natteheide (Brandenburg) - Zeugnisse historischer Landnutzung. In: Harteisen, U., Schmidt, A. & M. Wulf (Hrsg.), 2001. Kulturlandschaftsforschung und Umweltplanung. GCA-Verlag, Reihe Forschen und Wissen - Landschaftsgestaltung, Herdecke: 101-111.
- Hiller, D. 2007. Bodenerosion durch Wasser. Hrsg. Landwirtschaftskammer NRW, Münster, 37 S.
- Jankuhn, H. 1979. Vorwort. In: Beck, H., Denecke, D. & H. Jankuhn.: Untersuchungen zur eisenzeitl. u. frühmittelalterl. Flur in Mitteleuropa u. ihrer Nutzung. Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen: 5 - 7
- Janssen, W. 1979. Altfluren am Mittel- und Niederrhein. In: Beck, H., Denecke, D. & H. Jankuhn: Untersuchungen zur eisenzeitl. u. frühmittelalterl. Flur in Mitteleuropa u. ihrer Nutzung. Vandenhoeck und Ruprecht, Göttingen: 338 - 375
- Katur, L. & H. Wedel 2010. Landesflug digitales Geländemodell. Vermessung Brandenburg. Potsdam, 15 (1), 53 - 62

- Kirkby, M.J., Jones, R.J.A., Irvine, B., Gobin, A., Govers, G., Cerdan, O., Van Rompaey, A.J.J., Le Bissonnais, Y., Daroussin, J., King, D., Montanarella, L., Grimm, M., Vieillefont, V., Puigdefabregas, J., Boer, M., Kosmas, C., Yassoglou, N., Tsara, M., Mantel, S., Van Lynden, G.J. & J. Huting 2004. Pan-European Soil Erosion Risk Assessment: The PESERA Map, Version 1 October 2003. Explanation of Special Publication Ispra 2004 No.73 (S.PI.04.73). European Soil Bureau Research Report No.16, EUR 21176, 18pp. and 1 map in ISO B1 format. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.
- Krumbiegel, D. & W. Schwinge 1991. Witterung – Klima (Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg und Berlin). Deutscher Wetterdienst, Wetteramt Potsdam, Agrarmeteorologische Beratung. 80 S.
- Kuhnert, M. 2009. Quantification of surface runoff and soil erosion on water repellent soils. urn:nbn:de:kobv:517-opus-32871
- Kuo, W.K., Steenhuis, T.S., McCulloch, C.E., Mohler, C.L., Weinstein, D.A., DeGloria, S.D. & D.P. Swaney 1999. Effect of grid size on runoff and soil moisture for a variable-source-area hydrology model. *Water Resources Research*, 35, (11), 3419-3428
- LGB Brandenburg. Landesvermessung und Geobasisinformation Brandenburg, [http://geobroker.geobasis-bb.de/index.php?aProductName=Kalender\\_2008](http://geobroker.geobasis-bb.de/index.php?aProductName=Kalender_2008) (10.12.2012)
- LGB, 2009. Die Vermesser am Fluss. Landesvermessung und Geobasisinformation Brandenburg, 107 S.
- Lück, E., Eisenreich, M. & H. Domsch 2002. Innovative Kartiermethoden für die teilflächenspezifische Landwirtschaft. *Stoffdynamik in Geosystemen*. Volume 7. ISSN 0949-4731
- Lück, E., Eisenreich, M., Domsch, H. & O. Blumenstein 2000. Geophysik für Landwirtschaft und Bodenkunde. *Stoffdynamik in Geosystemen*. Volume 4. ISSN 0949-4731
- Malitz, G. 2007. Analyse der hydrometeorologischen Verhältnisse in Bezug auf das Auftreten von Starkniederschlag am Pfingstwochenende 2007 und an weiteren Tagen des Jahres 2007 im Raum Brielow. Deutscher Wetterdienst, Abtlg. Hydrometeorologie, unveröff. Gutachten
- McNeill, J.D. 1980. Electromagnetic terrain conductivity measurement at low induction numbers. Geonics Limited, Technical Note TN-6.
- MdI Brandenburg 2004. Richtlinien für die Einrichtung der Automatisierten Liegenschaftskarte in Brandenburg (ALK-Richtlinien). <http://brandenburg.de/sixcms/media.php/1071/73000501.pdf>
- Methodenbuch Band 1 1991. Die Untersuchung von Böden. VDLUFA-Verlag, Darmstadt 4. Auflage
- Michael, A., Schmidt, J. & W. Schmidt 1996. Band II Parameterkatalog Sachsen, Anwendung. In: EROSION 2D/3D - Ein Computermodell zur Simulation der Bodenerosion durch Wasser. Sächs. Landesanstalt f. Landw. Dresden.
- Montgomery, D.R. 2010. Dreck: Warum unsere Zivilisation den Boden unter den Füßen verliert. Oekom verlag, München, 351 S.
- Nietzsche, O., Krück, S., Zimmerling, B. & W. Schmidt 2002. Boden- und gewässerschonende Landwirtschaft in Flusseinzugsgebieten. *Berichte aus der Pflanzenproduktion, SR Sächs. Landesanstalt Landwirtschaft*, 11, 1-22 ([http://www.smul.sachsen.de/lfl/publikationen/download/76\\_1.pdf](http://www.smul.sachsen.de/lfl/publikationen/download/76_1.pdf))
- Notebaert, B., Verstraeten, G., Ward, P., Renssen, H. & A. Van Rompaey 2011. Modeling the sensitivity of sediment and water runoff dynamics to Holocene climate and land use changes at the catchment scale. *Geomorphology*, 126(1-2): 18-31
- Pimentel, D. & N. Kounang 1998. *Ecology of Soil Erosion*. Ecosystems, Springer Verlag, 1: 416–426
- Renard, K.G., G.R. Foster, G.A. Weesies, D.K., Mc Cool & D.C. Yoder 1997. *Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. USDA Agriculture Handbook No. 703, 404 S.
- Schmidt, J. 1996. Entwicklung und Anwendung eines physikalisch begründeten Simulationsmodells für die Erosion geneigter, landwirtschaftlicher Nutzflächen. (Berliner Geographische Abhandlungen, 61). Berlin, Institut für Geographische Wissenschaften der FU, 148 S

- Schmidt, J., v. Werner, M. & A. Michael 1996. EROSION 2D/3D - Ein Computermodell zur Simulation der Bodenerosion durch Wasser. Sächs. Landesanstalt f. Landw. Dresden.
- Schwertmann, U., W. Vogl & M. Kainz 1990. Bodenerosion durch Wasser: Vorhersage des Abtrags und Bewertung von Gegenmaßnahmen. Ulmer, Stuttgart, 64 S.
- Voß, J., Schwan, A., Heyne, W. & N. Müller 2010. Erosionsschutz in reliefbedingten Abflussbahnen. Die Schriftenreihe des LfULG, Heft 13/2010, 92 S.
- Weigl, E. 2007. Niederschlagsmessung per Radar für wasserwirtschaftliche Anwendungen. [http://www.dwd.de/RADOLAN ...radolankurzbeschreibung\\_pdf.pdf](http://www.dwd.de/RADOLAN...radolankurzbeschreibung_pdf.pdf)
- Werner v., M. 1995. GIS-orientierte Methoden der digitalen Reliefanalyse zur Modellierung von Bodenerosion in kleinen Einzugsgebieten. Dissertation. Freie Universität Berlin
- Werner v., M. 2005. EROSION-3D Ver.3.11 Benutzerhandbuch, . GeoGnostics Software 74 S. und Anlage
- Werner v., M. 2010. <http://www.geognostics.de/>
- Wischmeier, W.H. & D.D. SMITH 1978. Predicting Rainfall Erosion Losses - A Guide to Conservation Planning. Agriculture Handbook No. 537. - Washington D.C.
- Wischmeier, W.H. 1976. Use and Misuse of the Universal Soil Loss Equation. In: Journal of Soil and Water Cons. 31, 5-9.
- Wulf, M. (2000). Kulturlandschaftsforschung in Brandenburg. Beispiel Wölbäcker in der Prignitz. In: Harteisen, U., Schmidt, A. & Wulf, M. (Hrsg.), 2001. Kulturlandschaftsforschung und Umweltplanung. GCA-Verlag, Reihe Forschen und Wissen - Landschaftsgestaltung, Herdecke, 87-100.
- Karten- und Luftbildauszüge mit Genehmigung des LGB Brandenburg © GeoBasis-DE/LGB 2009*
- Diese Forschung wurde gefördert durch das Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten und das Ministerium für Infrastruktur und Landwirtschaft des Landes Brandenburg.*
- Den beiden Gutachtern danke ich für ihre hilfreichen Kommentare.*