

UNIGIS Salzburg
Zentrum für Geoinformatik,
Universität Salzburg

MASTER THESIS

Vergleich und Bewertung hydrologischer Extremabfluss-
ermittlungen unter Verwendung von GIS in Bezug auf:

- ingenieurhydrologische Fragestellungen
- für kleine Einzugsgebiete (< 200 km²)

anhand eines Referenzgebietes in Süd-Thüringen

Freie wissenschaftliche Arbeit zur Erlangung des postgradualen akademischen Abschlusses
Master of advanced Studies in Geographical Science & Systems - MAS (GIS) - im Fernstu-
diengang Unigis MAS an der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität
Salzburg, Institut für Geographie und Angewandte Geoinformatik.

Vorgelegt: Erstgutachter: Prof. Dr. Josef Strobl

Zweitgutachter: Mag. Jürgen Praher

von: Reinhold Stahlmann

geboren am 14. Januar 1972

aus: D-95511 Mistelbach

Eingereicht: Oktober 2004

Zusammenfassung

In dieser Arbeit werden die Möglichkeiten und Grenzen des GIS-Einsatzes bei der hydraulischen Ermittlung von Extremabflüssen in Abhängigkeit ihrer statistischen Wiederkehrzeit untersucht. Dabei wird vor allem auf verschiedene Verfahren der hydrologischen Basisdatenermittlung eingegangen.

Es zeigt sich, dass bei der Bestimmung von flächigen Parametern eine weitgehende Übereinstimmung in den Ergebnissen der verwendeten Methoden erzielt werden kann. Längenbestimmungen sind jedoch stark vom Maßstab und dem verwendeten Verfahren abhängig.

Die Nutzung der ermittelten Parameter bei deterministischen Modellen zeigt, dass sich die Wahl der Ermittlungsmethode nach dem verwendeten Modell richten muss. Es ist darauf zu achten, möglichst analoge Verfahren wie der Modellentwickler anzuwenden, um systematische Fehler zu vermeiden.

Beim Vergleich der Modellergebnisse mit der im Untersuchungsgebiet vorliegenden Hochwasserstatistik wird deutlich, dass Modelle mit unzureichender Regionalisierung nicht übertragbar sind.

Durch die Verwendung von standardisierten Arbeitsmethoden, wie sie von Geographischen Informationssystemen bereitgestellt werden, wäre es möglich, vorhandene Modelle neu zu eichen und mit zusätzlichen Regionalisierungsparametern zu verbessern. Dies würde eine vom Anwender unabhängige Genauigkeit fördern und zu übertragbareren Ergebnissen führen.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	i
Kartenverzeichnis	v
Abbildungsverzeichnis	vi
Tabellenverzeichnis	ix
Abkürzungsverzeichnis	x
1 Anlass und Ziel.....	1
2 Gliederung der Arbeit.....	2
3 Hydrologische Grundlagen	3
3.1 Begriffe und thematische Problematik	3
3.2 Hydrologische Abläufe	4
3.2.1 Der Wasserkreislauf	4
3.2.2 Der Niederschlag–Abfluss–Prozess	6
3.2.3 Der Abfluss als Ganglinie	7
3.3 Historischer Abriss und Entwicklungstendenzen.....	8
4 Auswahl des Referenzgebietes	9
5 Hydraulische Basisdatengewinnung mit GIS.....	12
5.1 Schaffung einer homogenen Datenbasis	12
5.1.1 Koordinatensysteme und Projektionen.....	12
5.1.2 Höhensysteme	14

5.2	Wasserscheiden und Einzugsgebietsgröße	15
5.2.1	Manuelle Ermittlung durch Auswertung von Höhenlinien	16
5.2.2	Berechnung mittels Digitalem Höhenmodell	19
5.3	Gebietsrelief und mittleres Geländegefälle	24
5.3.1	Ermittlung anhand von Höhenlinien	24
5.3.2	Berechnung mittels Digitalem Höhenmodell	25
5.4	Gewässernetz.....	27
5.4.1	Bestimmung des längsten Fließweges anhand von Karten	27
5.4.2	Bestimmung des längsten Fließweges mittels DGM	27
5.4.3	Integrales Gewässergefälle.....	30
5.5	Landnutzung	32
5.6	Boden	34
5.7	Niederschlag.....	36
5.7.1	Statistische Niederschlagswerte	36
5.7.2	Regenfelder und Wetterradar	40
6	Abflussmodelle.....	41
6.1	Bedeutung von Abflussmodellen	41
6.2	Taxonomie der Abflussmodelle	42
6.2.1	Klassifikation nach hydrologischen Dimensionen.....	42
6.2.2	Klassifikation nach Art der Implementierung	46
6.3	Die Rolle von GIS bei der Abflussmodellierung	47
6.3.1	Probleme bei der Einbeziehung von GIS in die Abflussmodellierung	47

6.3.2	Das ArcGIS Hydro data model	48
6.4	Kriterien der Modellauswahl.....	49
6.5	Deterministische, räumlich aggregierte Modelle	50
6.5.1	Lauterbach – Glos	51
6.5.2	Das Lutz-Verfahren.....	57
6.6	Stochastische Modelle.....	63
6.7	Vergleichende Gegenüberstellung	66
7	Interpretation der Ergebnisse	67
8	Literaturverzeichnis.....	69
	Anhang	73
	Glossar.....	74
	Tabellen.....	75
	Tabellarischer Lebenslauf	77
	Eidesstattliche Versicherung	79

Kartenverzeichnis

Karte 1: Lage des Referenzeinzugsgebietes am Pegel Steinach/Steinach 10

Verwendete Kartengrundlagen: GfK MACON AG (2003): *Europa administrativ – europe_NUTS2_03.shp* – http://www.macon.de/digitale_landkarten/samples.htm.

ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE, INC. (1999): *ArcView data europe – mjrivers.shp* – Bestandteil des Softwarepakets ArcView 3.2.

THÜRINGER LANDESANSTALT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE (2004): *Thüringer Flussgebiete* – http://ammer.geogr.uni-jena.de/sites2000/newwq/index_map.html.

Projektion: Gauß Krüger, Transverse Mercator Projektion, Spheroid Bessel 1841 (6377397.155, 299.1528128), False Easting 4500000, False_Northing 0, Zentralmeridian 12, Greenwich, Meter 1.

Maßstab: ca. 1: 2.000.000

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Projektablauf dieser Arbeit	2
Abbildung 2: Der Abfluss als Bestandteil des Wasserkreislaufes und beeinflusst durch mehrere Teilspeicherprozesse und räumliche Parameter. Hintergrundlandschaft aus [19] MAIDMENT, 2002, S. 19.	4
Abbildung 3: Niederschlag-Abfluss-Prozess aus [25] SCHRÖDER, 1994, S. 36.....	6
Abbildung 4: Zerlegung einer Ganglinie a) für Zeitreihenmodelle in: b) Trend, c) saisonale, d) stochastische Komponente und e) Residuen. Aus [21] Mehlhorn, 1996, S. 38.....	7
Abbildung 5: Blick in das Gewässerbett der Steinach, ca. 500 m oberhalb des Pegels Steinach/Steinach. Foto R. Stahlmann, 20.08.2004	11
Abbildung 6: Vorgehensweise zur manuellen Abgrenzung von Einzugsgebieten	17
Abbildung 7: Ermittlung der Einzugsgebietsgrenzen des Pegels Steinach/Steinach durch das Staatliches Umweltamt Suhl (rote Polylinie) und R. Stahlmann (blaue Polylinie) anhand von Höhenlinien aus topographischen Karten.	18
Abbildung 8: Lokale Senken im DGM25, ermittelt durch Hydrotools.avx.....	21
Abbildung 9: Abflusslose Senken in einem digitalen Höhenmodell und ihre Korrektur. Aus ([24] SCHÄUBLE, 2004, S.5)	22
Abbildung 10: Perspektivische Ansicht des Einzugsgebietes Steinach/Steinach (rot umrandet) auf Topographischer Karte 1:50.000, Höheninformation DGM25 mit 1,5-facher Überhöhung. Darstellung durch ArcView 3D-Analyst V 1.0a.	23
Abbildung 11: Histogramm der Höhenlinien- und DHM-Methode zur Bestimmung des mittleren Geländegefälles.....	25
Abbildung 12: Veränderung der Auflösung des 20x20 m Ursprungs-DHM (Mitte, braun) durch Verdoppelung der Auflösung auf 10x10m (grün, links) und Fünfteln auf 100x100m Rastergröße (grün, rechts). Darüber liegen Höhenkonturen, Höhendifferenz 10 m.....	28
Abbildung 13: Gewässerlängsschnittsflächen, oben durch Wahl eines Stützpunktes aus der topographischen Karte, unten durch Generierung eines Gewässerlängsschnittes im DHM. Das Darstellungsverhältnis Höhe zu Länge beträgt 5:1.....	30
Abbildung 14: Erzeugung eines Gewässerlängsschnittes durch die Verwendung eines DHM's in ArcView. Die beiden Dreiecke symbolisieren den Basispunkt und den entferntesten	

<p>Gewässerpunkt im Einzugsgebiet. Entlang der blauen Linie wird der Längsschnitt erzeugt. Das DHM ist von grün (tiefer gelegen) nach hellgrau (höher gelegen) eingefärbt. </p>	31
<p>Abbildung 15: Die Landnutzung von Deutschland dargestellt durch das europäische CORINE Land Cover Programm.</p>	32
<p>Abbildung 16: Überführung des Einzellayers "Wald Vollton" der digitalen Topographischen Übersichtskarte Thüringens 1:250.000, PD83, in eine dreistufige Landnutzungskarte (dunkelgrün = Wald, hellgrün = Dauergrünland und rot = Bebauung). Das magenta-farbene Einzugsgebiet dient zur Orientierung.....</p>	33
<p>Abbildung 17: Einteilung der 11 im Gebiet vorkommenden Leitbodenformen in 4 Klassen als Vorbereitung zur hydrologischen Modellierung. (Hellblau entspricht dem größten Rückhaltevermögen, dunkelblau dem geringsten). Das magenta-farbene Einzugsgebiet dient zur Orientierung.</p>	35
<p>Abbildung 18: Aufteilung des Einzugsgebiets Steinach/Steinach zur Ermittlung der Starkniederschlagshöhen in Abhängigkeit der Wiederholungszeit. Niederschlagsverteilungskarte 12 Stundenregen mit einjähriger Überschreitungswahrscheinlichkeit aus ([7] DWD, 1997).</p>	37
<p>Abbildung 19: Radarstationen für die quantitative Niederschlagsmessung in Deutschland. Internet http://www.dwd.de/de/FundE/Fern/Radar/radstand.htm, 15.08.2004.....</p>	40
<p>Abbildung 20: Abflussmodelle als Funktion von Zufall, Raum und Zeit.....</p>	42
<p>Abbildung 21: Gliederung von Abflussmodellen aufgrund des kausalen Zusammenhangs ...</p>	46
<p>Abbildung 22: Beziehungen hydrologischer Objektklassen im ArcGIS™ Hydro data model. Aus ([19] MAIDMENT, 2002, S. 122).....</p>	48
<p>Abbildung 23: Ortsfaktoren "α" nach Lauterbach/Glos aus ([15] LAUTERBACH, 1965).</p>	53
<p>Abbildung 24: Ortsfaktoren "β" nach Lauterbach/Glos aus ([15] LAUTERBACH, 1965).</p>	54
<p>Abbildung 25: Berechnung der Scheitelabflüsse nach Lauterbach u. Glos. Die Ausgangsparameter wurden durch Auswertung der Topographischen Karte im Maßstab 1:50.000 ermittelt.</p>	56
<p>Abbildung 26: Berechnung der Scheitelabflüsse nach Lauterbach/Glos. Die Ausgangsparameter wurden durch Auswertung eines digitalen Höhenmodells ermittelt.</p>	56
<p>Abbildung 27: Bestimmung der Anfangsverluste A'_v und A_v. Aus [17] LUTZ, 1984, S. 79. .</p>	58
<p>Abbildung 28: Ermittlung der Gebietsbeiwerte. Links Abflussbeiwerte (hellblau gering und dunkelblau hoch), rechts Anfangsverluste (weiß gering, dunkelbraun hoch).....</p>	59

Abbildung 29: Bestimmung des maximalen Abflussbeiwertes c . Aus [17] LUTZ, 1984, S. 80.	59
Abbildung 30: Diagramm zur Ermittlung des Normabflusses QS^* . Aus [17] LUTZ, 1984, S. 154.....	60
Abbildung 31: Berechnung der Scheitelabflüsse nach Lutz. Die Ausgangsparameter wurden durch Auswertung der Topographischen Karte im Maßstab 1:50.000 ermittelt.....	61
Abbildung 32: Ermittlung der Hochwasser-Ganglinie mit dem Programm IHW-Abfluss.....	62
Abbildung 33: Schreib- und Online-Hochwassermeldepegel in Steinach am Gewässer Steinach. Foto R. Stahlmann, 20.08.2004.....	63
Abbildung 34: Jahresabflussmaxima am Pegel Steinach/Steinach. Ausdruck aus dem Hochwasserstatistikprogramm HQ-Ex® des Staatlichen Umweltamtes Suhl.....	64
Abbildung 35: Verteilungsfunktion der drei bestangepassten Verteilungskurven (Extremwert Typ 1, Pearson Typ III und Weibull-III Verteilung) für den Pegel Steinach/Steinach. Ausdruck aus dem Hochwasserstatistikprogramm HQ-Ex® des Staatlichen Umweltamtes Suhl.....	64
Abbildung 36: Maximalabflüsse unterschiedlicher Verteilungsfunktionen und Schätzmethoden in Abhängigkeit ihrer Wiederkehrzeit . Ausdruck aus dem Hochwasserstatistikprogramm HQ-Ex® des Staatlichen Umweltamtes Suhl.....	65

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Transformationsparameter von ETRS89 nach TH PD83.....	13
Tabelle 2: Ergebnisse der Einzugsgebietsermittlung aus Höhenlinien	18
Tabelle 3: Von der Thüringer Landesvermessung angebotene Digitale Höhenmodelle	20
Tabelle 4: Ermittlung der arithmetisch flächengemittelten Eingabewerte für KOSTAB.EXE.	38
Tabelle 5: Minima der Niederschlagshäufigkeiten in Abhängigkeit der Wiederkehrzeit. Ergebnistabelle aus KOSTAB.EXE, gekürzt und verändert.....	38
Tabelle 6: Maxima der Niederschlagshäufigkeiten in Abhängigkeit der Wiederkehrzeit. Ergebnistabelle aus KOSTAB.EXE, gekürzt und verändert.....	39
Tabelle 7: Variablen zur Bestimmung der Jährlichkeit nach dem Modell nach Lauterbach- Glos ([15] LAUTERBACH, 1965, S.33)......	52
Tabelle 8: Gegenüberstellung der Berechnungsergebnisse und prozentuale Abweichung von der Hochwasserstatistik am Pegel Steinach/Steinach Extremwertverteilung Typ 1.....	66

Abkürzungsverzeichnis

- ASCII** American Standard Code for Information Interchange
- CAD** Computer Aided Design
- DGM** Digitales Geländemodell, wird oft synonym zu DHM verwendet, besitzt jedoch außer den Höheninformationen noch weitere Geländeeigenschaften.
- DHM** Digitales Höhenmodell
- GIS** Geographisches Informationssystem
- HHQ** Höchster Hochwasserabfluss in [m³/s] der je an einer bestimmten Stelle des Gewässers gemessen wurde.
- HQ** Hochwasserabfluss in [m³/s]. Höchster Abfluss (Maximum der Abflussganglinie) innerhalb des Zeitraumes T.
- HQ_x** Hochwasserabfluss in [m³/s] als Scheitelabfluss (Maxima) von Hochwasserwellen in Abhängigkeit seiner Wahrscheinlichkeit, angegeben als Jährlichkeit (siehe T_n).
- HRU** Hydrological Response Unit = Hydrologische Reaktions-Einheit (siehe Glossar)
- MHQ** Mittlerer Hochwasserabfluss in [m³/s] als arithmetisches Mittel der über mehrere Jahre beobachteten Höchstabflusswerte HQ.
- MNQ** Mittlerer Niedrigwasserabfluss in [m³/s] als arithmetisches Mittel der über mehrere Jahre beobachteten Niedrigabflusswerte NQ.
- MQ** Mittlerer Abfluss in [m³/s] als arithmetisches Mittel innerhalb des Zeitraumes T.
- NA** Niederschlag–Abfluss, z.B. NA-Modell = Niederschlag–Abfluss–Modell
- NNQ** Niedrigster Niedrigwasserabfluss in [m³/s]. Niedrigste Abflussmenge die je an einer bestimmten Stelle des Gewässers gemessen wurde.
- NQ** Niedrigwasserabfluss in [m³/s]. Niedrigste Abflussmenge innerhalb eines Zeitraums.
- PD83** Potsdam Datum, Rauenbergssystem, Bezugsfläche Besselellipsoid
- T_n** Wiederholungszeitspanne bzw. Jährlichkeit, "n" wird in Jahren angegeben z.B. T₂ für eine zweijährliche oder T_{0,5} für eine halbjährliche Wiederholung.

1 Anlass und Ziel

Eines der wichtigsten Kriterien zur Dimensionierung und Beurteilung von gewässernahen Bauwerken ist das so genannte Bemessungshochwasser. Es entscheidet über das Risiko von Sach- und Personenschäden, über den Grad der Veränderung in Landschaftsbild und Naturhaushalt und über die Wirtschaftlichkeit einer geplanten Baumaßnahme. Als Bemessungshochwasser wird, in Abhängigkeit vom Schutzgrad, meist ein Hochwasserereignisses mit einer bestimmten mittleren Wiederholungszeitspanne von mehreren Jahren, Jahrzehnten oder Jahrhunderten gewählt. Konkrete Abflussdaten, wie z.B. die dabei auftretende Wassermenge pro Zeiteinheit, sind dabei in der Regel noch unbekannt, da diese an jeder Stelle im Gewässernetz unterschiedlich sind.

Ausgangspunkt und Inhalt dieser Arbeit ist die Bestimmung der Hochwasserabflussmenge (angegeben in Kubikmeter Wasser pro Sekunde) in Abhängigkeit der Wahrscheinlichkeit ihres Auftretens am Ort der Betrachtung. Ziel ist es, die unterstützende Wirkung von Geographischen Informationssystemen für diese konkrete hydrologische Fragestellung zu untersuchen und den Bedarf für weitergehende Untersuchungen zu prüfen. Erst nach Ermittlung der Abflussmengen ist es möglich, davon abgeleitete und planungsrelevante Parameter wie z.B. Wasserspiegelhöhen, Überschwemmungsgebietsgrenzen, Fließgeschwindigkeiten, Anströmwinkel von Objekten und Erosionsgefährdung zu berechnen. Der korrekten Bestimmung der Abflussmenge kommt somit eine elementare Bedeutung zu.

Der Arbeitsmaßstab orientiert sich an dem, was zur Zeit in der ingenieurhydrologischen Praxis mit vertretbarem Aufwand machbar ist, da die praktische Eignung den Untersuchungsschwerpunkt darstellen soll.

2 Gliederung der Arbeit

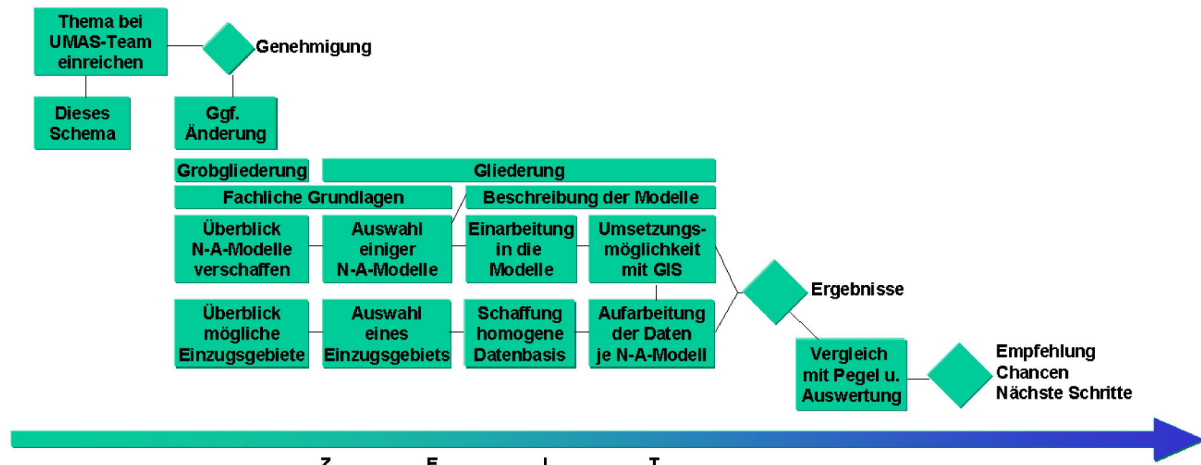


Abbildung 1: Projektablauf dieser Arbeit

Während die Erstellung der Arbeit eine eher parallele Betrachtung erforderte (siehe Abbildung 1), so lassen sich die Ergebnisse wie folgt strukturieren:

In Kapitel 3: Hydrologische Grundlagen, Seite 3f. wird die fachlich thematische Problematik der Abflussermittlung im historischen Kontext dargelegt und wichtige hydrologische Grundlagen erläutert.

Die Auswahlkriterien für das Referenzgebiet und eine Kurzbeschreibung wichtiger Pegelstammdaten finden sich in Kapitel 4: Auswahl des Referenzgebietes, Seite 9f..

Viele die Hydrologie beeinflussenden Gebiets-Charakteristika werden analog von unterschiedlichen Abfluss-Modellen benötigt. Modellunabhängige GIS-Ansätze zur Bestimmung dieser Ausgangsdaten werden in Kapitel 5: Hydraulische Basisdatengewinnung mit GIS, Seite 12f. aufgeführt, verglichen und für das Referenzgebiet angewendet. Die dabei gewonnenen Daten fließen in spätere Modellberechnungen ein.

Einen Überblick über den konzeptionellen Aufbau der derzeit verwendeten Abflussmodelle schafft Kapitel 6: Abflussmodelle, Seite 41f.. Im Anschluss werden einige gebräuchliche Abflussmodelle näher beschrieben und für das Referenzgebiet vergleichend angewendet.

Die Ergebnisse dieser Arbeit werden in Kapitel 7: Interpretation der Ergebnisse, Seite 67f. diskutiert und beurteilt.

3 Hydrologische Grundlagen

3.1 *Begriffe und thematische Problematik*

Hydrologie ist die Wissenschaft vom Wasser, seinen Eigenschaften, Erscheinungsformen, Inhaltsstoffen und deren Zusammenhängen. Dies betrifft sowohl das Wasser auf, als auch über und unter der Erdoberfläche. Gemäß dem internationalen Sprachgebrauch betrachtet die Hydrologie nur das Wasser des Festlandes und die Ozeanographie das Wasser der Meere.

Die Ingenieurhydrologie ist ein Teilbereich der Hydrologie, der Techniken zur Lösung konkreter wasserwirtschaftlicher Aufgaben bereitstellt. Dies sind z.B. hydrologische Methoden, die in der Planung, beim Bau, Betrieb und der Bewirtschaftung von Bauwerken an Gewässern zur Anwendung kommen. Weitere Verfahren dienen zur Vorhersage von hydrologischen Ereignissen ([20] MANIAK, 1997, S.1). Als Ergänzung zum Aufgabenfeld der theoretischen Hydrologie liegen der Ingenieurhydrologie pragmatische, gesamtwirtschaftliche und humanitäre Prinzipien zugrunde. Die Synthese aus wissenschaftlichem Erkenntnisstand, wirtschaftlicher Machbarkeit, Schutz von Mensch, Natur und Sachgütern spiegelt sich in dem jeweiligen "Stand der Technik", den Regelwerken und Normen wieder, welche den aktuellen gesellschaftlichen Konsens darstellen und sich deshalb in ständiger Veränderung befinden.

Geographische Informationssysteme sind Computerprogramme, die eine Vielzahl von Werkzeugen zur Verfügung stellen, um räumliche Daten zu visualisieren, abzufragen, zu analysieren ([8] ESRI, 1996, S.1). Darüber hinaus können durch Datenaggregation, -transformation und -synthese neue Daten und Ergebnisse gewonnen werden ([22] NETELER, 2000, S.1). Diese Eigenschaften prädestinieren die Verwendung von GIS im Zusammenhang mit der Lösung hydrologischer Probleme.

3.2 Hydrologische Abläufe

3.2.1 Der Wasserkreislauf

Hydrologische Prozesse unterliegen physikalischen Gesetzmäßigkeiten. Die Kenntnis dieser Zusammenhänge ist Voraussetzung für die richtige Anwendung von ingenieurhydrologischen Modellen und unterstützenden GIS-Werkzeugen, um Ergebnisse auf Plausibilität zu prüfen und die vielfältigen Justiermöglichkeiten an hydrologischen Modellen und Geoinformations-Software (GI-Software) fachlich korrekt anzuwenden. Die Beschreibung der Wasserkreisläufe bildet die kausale Basis bei der Berechnung der Wassermenge pro Zeiteinheit an einer bestimmten Gewässerstelle.

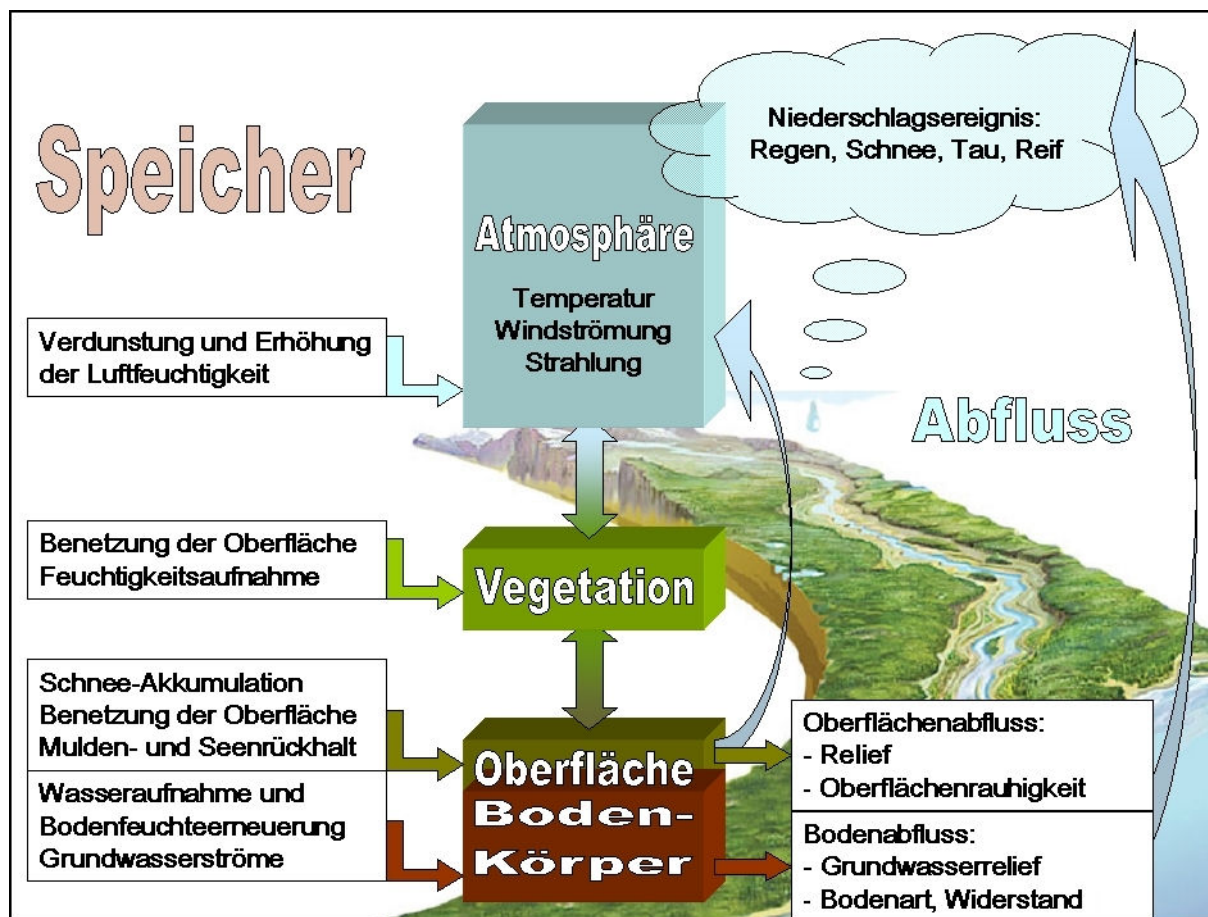


Abbildung 2: Der Abfluss als Bestandteil des Wasserkreislaufes und beeinflusst durch mehrere Teilspeicherprozesse und räumliche Parameter. Hintergrundlandschaft aus [19] MAIDMENT, 2002, S. 19.

Zur Erläuterung der vorangegangenen Darstellung sollen insbesondere folgende Punkte hervorgehoben werden:

- Abflussvorgänge hängen nicht nur von den spezifischen Eigenschaften des Wassers ab, das bei unterschiedlichen Temperaturen unterschiedliche Aggregatzustände und Viskosität besitzt. Der konkrete Abfluss ist vielmehr das Ergebnis unterschiedlicher Teilprozesse, die untereinander in Interaktion stehen.
- Daraus folgt, dass sich der Wasserkreislauf aus einer Vielzahl von Teilkreisläufen zusammensetzt.
- Eine besondere Bedeutung bei der Abflussbildung kommt den zahlreichen Speichern zu. Sie bewirken, dass nur ein Teil des Niederschlags zum Abfluss gelangt und tragen durch ihre Retentionswirkung zum zeitlich verzögertem Abfluss und zur Translation der Hochwasserwelle bei.
- Das Klima hat nicht nur Auswirkungen auf Art und Menge der Niederschläge, sondern bestimmt auch den Grad der Verdunstung, Transpiration und Evaporation.
- Die räumlichen Eigenschaften des Gebietes wie das Relief, die Geologie, die Vegetation und Landnutzung bestimmen zu einem hohen Anteil den Abfluss. Auch bereits fließendes Wasser im Boden, in Gräben, Bächen oder Flüssen wird durch räumliche Parameter wie Durchströmungskoeffizienten oder Oberflächenrauigkeiten beeinflusst. Diese Tatsache legt die Verwendung von GIS in der Hydrologie nahe.

Aus der Betrachtung der Einzelparameter lassen sich abgeleitete Kennwerte wie Abflüsse, Wasserstände (ergeben sich wiederum aus den Abflüssen und den Eigenschaften des Gewässerprofils), Bodenfeuchte und Grundwasserstände ermitteln. Aus diesem Gesamtverständnis heraus können begründete Vereinfachungen getroffen werden, die sich im Grad der Detaillierung und der Anzahl der verwendeten Modellparameter im jeweiligen Modell widerspiegeln. Dadurch sind bei der Betrachtung hydrologischer Prozesse immer zufällige und deterministische Komponenten enthalten ([16] LECHER, 2001, S.318).

3.2.2 Der Niederschlag–Abfluss–Prozess

Fällt Niederschlag auf ein Einzugsgebiet, so kommt dieser nur zum Teil (Verdunstung und Speicherung) und zeitlich stark verzögert und gedämpft (Translationswirkung durch Fließwiderstände) zum Abfluss. Das im Bodenkörper gespeicherte Wasser führt über die Grundwasseranreicherung zu dem sogenannten Basisabfluss (siehe Abbildung).

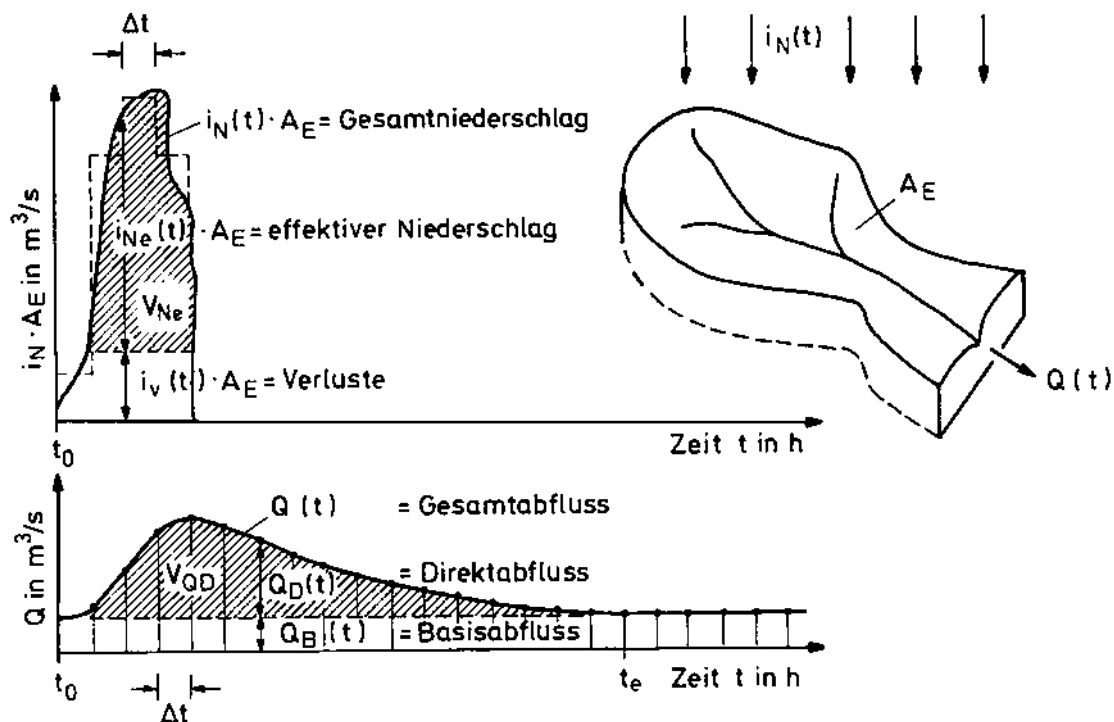


Abbildung 3: Niederschlag-Abfluss-Prozess aus [25] SCHRÖDER, 1994, S. 36.

Der Direktabfluss wird nur von einem Teil des Niederschlags (= Effektivniederschlag) gebildet. Der grundwasserneubildende Anteil des Niederschlags führt zum Basisabfluss. Für den Zeitraum vom Beginn des Regenereignisses bis zum Abschwelen des Abflusses auf den Basisabfluss gilt näherungsweise folgende Volumengleichung ([25] SCHRÖDER, 1994, S.35f) :

$$\int_{t_0}^{t_e} Q_D(t) dt = \int_{t_0}^{t_e} i_{Ne}(t) \cdot A_E dt \quad [m^3]$$

mit Q_D = Direktabfluss an Gewässerstelle xy, i_{Ne} = Effektivniederschlag, A_E = Einzugsgebiet

3.2.3 Der Abfluss als Ganglinie

Die Summe aller ablaufenden physikalischen Prozesse führt im Gewässer zu schwankenden Abflüssen. Die an Pegelstellen gemessenen Abflüsse werden in Form von Ganglinien graphisch dargestellt. Die X-Achse repräsentiert die Zeitachse, die Y-Achse stellt die Abflüsse in $[m^3/s]$ dar. Die Ganglinie kann als Überlagerung von mehreren Einzelkurven, wie Trends, saisonalen bzw. zyklisch-stochastischen Komponenten und rein zufallsbedingten Residuen beschrieben werden ([21] Mehlhorn, 1996, S.38). Die über diesen Weg ermittelten empirischen Einzelkurven können auf kausale Zusammenhänge hin untersucht werden.

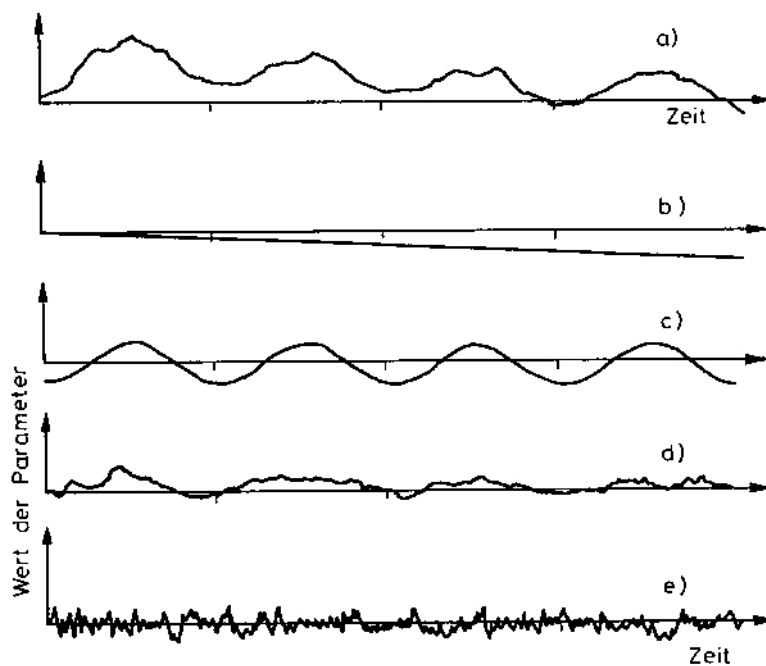


Abbildung 4: Zerlegung einer Ganglinie a) für Zeitreihenmodelle in: b) Trend, c) saisonale, d) stochastische Komponente und e) Residuen. Aus [21] Mehlhorn, 1996, S. 38.

3.3 Historischer Abriss und Entwicklungstendenzen

Antike Bauwerke wie z.B. Bewässerungsanlagen in Mesopotamien und China belegen, dass das praktische Wissen im Umgang mit Wasser seit Beginn des Ackerbaues ständig anwuchs. Viele Philosophen wie Homer (ca. 1.000 v.Chr.) arbeiteten am Prinzip des Wasserkreislaufes, der jedoch erst zu Beginn der neuen Zeitrechnung durch M. Vitruvius in seiner heutigen Form bekannt wurde. Beginnend mit der naturwissenschaftlichen Beobachtung (ca. ab 1400, da Vinci und andere) wurden hydrologische Konzepte weiter untermauert. Ab 1600 begann man Naturereignisse nicht nur zu betrachten, sondern sie durch breit angelegte Messreihen systematisch zu dokumentieren. Das folgende Jahrhundert war mit der Durchführung zahlreicher Experimente gekennzeichnet. Die von Bernoulli entdeckten Gesetzmäßigkeiten bilden heute die Grundlage für viele hydraulische Berechnungsverfahren. Von 1900 bis 1930 entstanden Hunderte empirischer Formeln, die durch Parameter an das jeweilige Gebiet anzupassen waren. Aus diesem Grund konnten die Ergebnisse jedoch kaum übertragen werden, so dass in den folgenden 20 Jahren vermehrt an quantitativen Modellen gearbeitet wurde. Von 1950 bis 1965 wurde begonnen, die quantitativen Modelle mit den aufkommenden Computern umzusetzen. 1965 rief die UNESCO die Internationale Hydrologische Dekade aus, um das verstreute hydrologische Wissen zusammenzuführen und für alle Staaten verfügbar zu machen ([3] CHOW, 1964, Kap.1, S.7 ff).

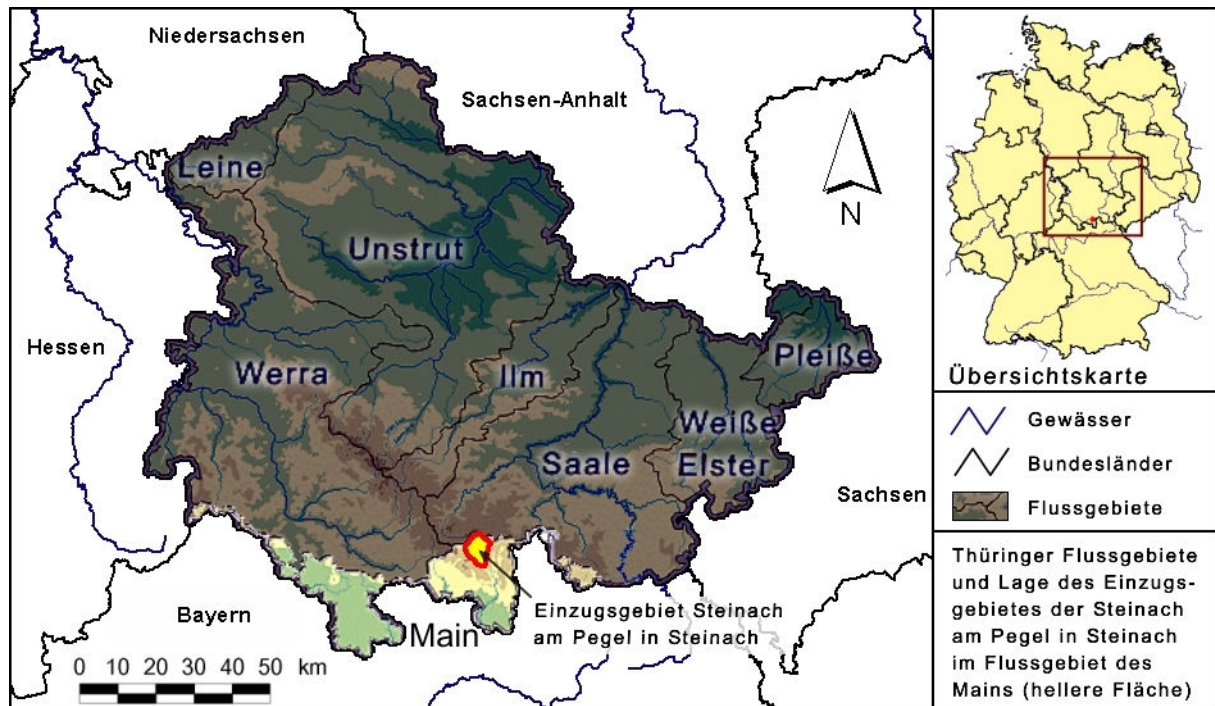
In den letzten Jahren führte die Entwicklung von leistungsstarken Computern und die weltweite Wissensvernetzung über Hochschulen und das Internet zu einer großen Zahl von Computermodellen, die sich das Vorhandensein von hochauflösenden Grundlagendaten zu nutze machen. Die Verwendung von Methoden der geographischen Informationsverarbeitung bewirkten Synergieeffekte sowohl für die hydrologische Modellierung als auch für die Weiterentwicklung von GIS. Die neuen Möglichkeiten führten zu ganzheitlichen Wasserhaushaltsmodellen mit einem hohen Detaillierungsgrad. Ihre Funktion wurde durch Modellprojekte bestätigt, die Etablierung in der Praxis fand jedoch nur vereinzelt statt, was mit hohem Bedienungsaufwand und hohen Kosten für die Ausgangsdaten zu erklären ist. Es scheint, als befinden wir uns derzeit in einer Orientierungsphase auf den Sprung zu einer neuen Modellgeneration, die jedoch durch eine restriktive Basisdateninfrastruktur und unkooperative Softwareentwicklung ins Stocken geraten ist.

4 Auswahl des Referenzgebietes

Zur Untersuchung der unterstützenden Wirkung von Geographischen Informationssystemen für die Abflussberechnung ist es ausreichend, dies vorerst für ein exemplarisches Einzugsgebiet zu tun. Aus den daraus gewonnenen Erfahrungen kann der Bedarf für eine statistische Absicherung besser abgeschätzt werden. Die Auswahl des Referenzeinzugsgebietes erfolgte nach folgenden Gesichtspunkten:

- Das Einzugsgebiet soll vollkommen in einem Bundesland liegen, um den administrativen Aufwand zu reduzieren.
- Es sollte sich um ein kleines Einzugsgebiet (< 200 km²) handeln, da für diese Gebiete meist nur wenig Pegelaufzeichnungen vorliegen und der Bedarf an Abflussmodellen entsprechend hoch ist. Des Weiteren sind viele Modelle nur für kleinere Einzugsgebiete geeignet, bei größeren Einzugsgebieten würde sich die Modellauswahl auf Flussgebietsmodelle beschränken. Ein weiterer wesentlicher Grund ist auch der dadurch verringerte Kostenaufwand und kürzere Rechenzeiten aufgrund geringerer Datenmengen.
- Das Einzugsgebiet sollte keine Talsperren, Rückhaltebecken oder Seen aufweisen, da diese Elemente eine zusätzliche Komplexität einbringen, die mehr Einfluss auf die Modellwahl und weniger auf die Verwendung von GIS haben.
- Es sollten langjährige Pegelaufzeichnungen vorliegen, welche die realen Abflüsse des Referenzgebietes wiedergeben und somit eine gewisse Vergleichbarkeit der Modellergebnisse ermöglichen.
- Das Einzugsgebiet sollte sich in der Zeit der Pegelaufzeichnungen wenig verändert haben, um eine stabile Auswertung der Pegeldaten zu ermöglichen.

Die Wahl fiel auf ein Einzugsgebiet des Gewässers Steinach. Der dort befindliche Pegel in der Ortschaft Steinach/Thüringen liegt im Flussgebiet des Mains. Er wird seit 1954 geführt und ist einer der Online-Hochwassermeldepegel Thüringens im Zuständigkeitsbereich des Staatlichen Umweltamtes Suhl.



Karte 1: Lage des Referenzeinzugsgebietes am Pegel Steinach/Steinach im thüringer Teil des Flussgebietes des Mains (heller dargestellte Landesfläche)

Der Pegel Steinach / Steinach hat folgende amtlichen Stammdaten (übergeben durch das Thüringer Staatliche Umweltamt Suhl):

Nummer des Pegels: 25240.1

Ordnung des Pegels: 1

Messtischblatt: 5532

Hochwert (PD83): 55 88 620

Rechtswert (PD83): 44 40 340

Messstelle: oberhalb der Mündung links

Art des Pegels: Schreibpegel

Bauart des Pegels: senkrechter Lattenpegel

Pegelnull: 485.551 m ü. NN

Einzugsgebiet: 37.2 km²

Lage o. Mündung: 43.2 km oberhalb Mündung

Beobachtet ab: 1954, 1988 versetzt, Messwerte wurden angepasst



**Abbildung 5: Blick in das Gewässerbett der Steinach, ca. 500 m oberhalb des Pegels Steinach/Steinach.
Foto R. Stahlmann, 20.08.2004**

5 Hydraulische Basisdatengewinnung mit GIS

5.1 Schaffung einer homogenen Datenbasis

Zur Ermittlung von Abflussvorgängen unter Einbeziehung der abflusswirksamen raumbezogenen Variablen ist es zunächst notwendig, eine homogene Ausgangsbasis zu schaffen. Sie bestimmt neben den reinen Modelleigenschaften die Qualität der Ergebnisse. Probleme ergeben sich in der Praxis derzeit weniger durch die Datenverfügbarkeit, sondern durch das Fehlen von Metadaten (s. S.74) und hohen Kosten aktueller Daten, weswegen oft auf ältere Grundlagen zurückgegriffen und der höhere Bearbeitungsaufwand in Kauf genommen wird.

5.1.1 Koordinatensysteme und Projektionen

Die Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV) beschloss 1991, dass für die neuen und alten Bundesländer ein gemeinsames Bezugssystem für Lage-, Höhe- und Schweremessungen zu schaffen ist. Auf Grund der wachsenden Bedeutung von Satellitendaten fiel die Wahl für Lagevermessungen auf das European Terrestrial Reference System 1989 (ETRS89/UTM). Bislang setzte jedoch nur das Bundesland Brandenburg den ADV-Beschluss um und führte 1996 ETRS89 als amtliches Bezugssystem der Lage ein ([1] ADV, ../broker.jsp?uMen=098769da-d319-fa6d-7879-f08a07b51a69 2004-10-03). Alle anderen Bundesländer haben proprietäre Bezugssysteme, was insbesondere dann Schwierigkeiten bereitet, wenn sich z.B. Gewässereinzugsgebiete auf der Fläche von mehreren Bundesländern erstrecken. Klaffungen von bis zu 3m an den Landesgrenzen sind keine Seltenheit.

Das System PD83 (Potsdam Datum 1983) ist nach wie vor das amtliche Bezugssystem für Lagedarstellungen in Thüringen. Der Zentralpunkt dieses Systems liegt in Rauenberg/Berlin, an dessen Stelle rechnerisch Potsdam (Potsdam Helmertturm) getreten ist. Als Bezugsfläche wird das Ellipsoid von Bessel 1841 (6377397.155 m, $f=299.1528128$) verwendet. Das PD83 ist aus einer Datumstransformation (2d, 4-Parametertransformation) entstanden. Die Parameter stammen aus 13 identischen Punkten des Reichsdreiecksnetzes (RDN) und des Krassowski Systems 42/83. Sie wurden entlang der Grenzen zu den Altbundesländern ermittelt. Lageangaben erfolgen durch metrische rechtwinklige Koordinaten im 3-Grad-Gauß-Krüger-

Meridianstreifensystem, die mit Hoch- und Rechtswert bezeichnet werden (Abstand Äquator und Meridian). In Thüringen befinden sich die beiden Mittelmeridiane $L=9^\circ$ und $L=12^\circ$ (überwiegender Teil), welche durch die Rechtswerte 3.500.000 und 4.500.000 repräsentiert sind ([29] TLVERMA, ../festpunkte/lage/content.html, 2004-09-28). Das Referenzeingebiet Steinach/Steinach liegt ca. 60 km östlich des 4. Gauß-Krüger-Meridianstreifens.

So lange ausschließlich aktuelle Kartengrundlagen über das Vermessungsamt bezogen werden, ergeben sich i.d.R. keine Homogenisierungsprobleme für hydrologische Fragestellungen. Sollen diese Daten jedoch mit anderen Quellen wie z.B. GPS-Einmessungen der Pegelstation, oder älteren Kartenwerken ergänzt werden, so entstehen drastische Abweichungen mit Arc-View3.2 Standard-Lage-Projektionsmethoden (in einem Fall 130 m), was möglicherweise auf die unterschiedlichen Zentralpunkte der Bessel-Ellipsoide zurückzuführen ist. Abhilfe schafft eine 7 Parameter Helmert-Transformation von ETRS89 nach PD83 mit unten aufgeführten Parametern (Mitteilung des Vermessungsamtes Thüringen, 22.06.2004, Herr Oschatz), wodurch eine absolute Lagegenauigkeit von besser als 20 cm und Höhengenaugkeiten von besser als 50 cm unter Verwendung eines Geoids zu erreichen sind. Zu beachten ist, dass je nach verwendeten Transformationsprogramm die Vorzeichen zu ändern sind.

ΔX	-563,4035	m
ΔY	- 59,85029	m
ΔZ	-447,20225	m
E_x	+ 0,48392	"
E_y	- 1,44465	"
E_z	+ 2,60664	"
μ	- 0,999993178	
oder	- 6,82236	ppm (= Kehrwert für Rückrechnung)

Tabelle 1: Transformationsparameter von ETRS89 nach TH PD83.

Bei der Umrechnung "von Hand" müssen die geographischen Koordinaten im ETRS98-WGS84-Datum (Länge und Breite und Höhe - als Höhe über dem WGS84-Ellipsoid), wie sie z.B. der GPS-Empfänger liefert, in kartesische Koordinaten überführt werden (earth-centered-earth-fixed). Danach werden diese XYZ-Koordinaten durch die oben genannten Parameter transformiert und anschließend in das Gauß-Krüger-System zurückgerechnet ([9] FÜRST, 2004, S.97f).

5.1.2 Höhensysteme

Eine eher untergeordnete Rolle bei der Ermittlung von Extremabflüssen spielen leicht differierende Höhenangaben durch die Höhenbezugssysteme NN, HN und NHN, da diese Einflüsse bei der Verwendung digitaler Geländemodelle nicht zum Tragen kommen, bzw. durch die DHM-Genauigkeit überlagert werden. In älteren Kartenwerken sind Höhenangaben meist in NN (Gebiet der ehemaligen BRD, Amsterdamer Pegel) und HN (Gebiet der ehemaligen DDR, Kronstädter Pegel) angegeben. Der Unterschied zwischen HN und NN beträgt ca. – 15cm und von NN zum aktuellen Höhensystem NHN +/-10cm, bedingt durch Kriegsschäden und Messfehler.

Das amtliche Höhenbezugssystem in Thüringen ist seit dem 01.07.2000 das Deutsche Haupthöhenetz 1992 (DHHN 92). Höhen im DHHN 92 werden als Normalhöhen mit den Ellipsoidparametern des Geodetic Reference System 1980 (GRS 80) angegeben. Bezugsfläche ist das mit Normalhöhennull (NHN) bezeichnete Quasigeoid. Durch den Anschluss des DHHN 92 an den Knotenpunkt "Unterirdische Festlegung Wallenhorst" des United European Levelling Network (UELN) verläuft das Quasigeoid durch den Nullpunkt des Amsterdamer Pegels. Höhenangaben im System DHHN 92 erhalten die Dimension "Meter über Normalhöhennull (m über NHN)" ([29] TLVERMA, 2004-09-28).

5.2 Wasserscheiden und Einzugsgebietsgröße

Sowohl die einfachsten deterministischen Verfahren, als auch aufwändige Niederschlags-Abfluss-Modelle beruhen auf der Auswertung von räumlichen Daten. Als kleinster gemeinsamer Nenner aller Modelle ist die Ermittlung der Einzugsgebietsgröße zu nennen.

Das Einzugsgebiet eines betrachteten Gewässerpunktes ist derjenige Flächenanteil der Erde, der keine Zuflüsse aufweist und dessen abfließendes Wasser vollständig den betrachteten Gewässerpunkt passiert ([31] VISCHER, 1993, S.6f). Das unterirdische Einzugsgebiet kann sich aufgrund wasserstauer und wasserleitender Schichten in Verwerfungen vom oberirdischen Einzugsgebiet unterscheiden. Angesichts der relativ flachgründigen Böden im Untersuchungsgebiet kann dieser Einfluss jedoch hier vernachlässigt werden.

Für die hydrologische Modellierung von stark inhomogenen Einzugsgebieten kann es vorteilhaft sein, ein Einzugsgebiet in mehrere Teileinzugsgebiete zu untergliedern, die in sich betrachtet weitgehend homogene Gebietseigenschaften aufweisen. Diese Teileinzugsgebiete werden durch ein hierarchisches Gewässernetz miteinander verbunden. Sie besitzen z.T. Zuflüsse aus anderen Teileinzugsgebieten, die Interaktion dieser Zuflüsse mit dem Teileinzugsgebiet wird jedoch meist vernachlässigt.

5.2.1 Manuelle Ermittlung durch Auswertung von Höhenlinien

Eine der ältesten Methoden die Einzugsgebietsfläche für einen Gewässerpunkt zu bestimmen ist die manuelle Ermittlung anhand von Höhenlinien aus topographischen Kartenwerken. Vor der breiten Verfügbarkeit von GIS wurde diese Arbeit meist durch direktes Einzeichnen in die Papierkarte und anschließende Flächenbestimmung mit Planimeter oder Zählfolie durchgeführt. Gegenwärtig werden Papierkarten meist eingescannt oder bereits digital erworben. Die Flächenbestimmung erfolgt dann am Computer durch manuelles Einzeichnen des Einzugsgebiets mit anschließender Flächenermittlung durch das GIS- oder CAD-System. Die Vorteile liegen dabei vor allem in der besseren Integration in den digitalen Arbeitsprozess. Eine höhere Genauigkeit in der Einzugsgebietsbestimmung oder größere finanzielle Einsparungen sind dabei kaum zu erwarten.

Datengewinnung:

Die deutsche Landesvermessung hat bundesweit eine blattschnittfreie 13-teilige CD-ROM der Topographischen Karte 1:50.000 zum Preis von 40,- € bis 49,- € je CD herausgegeben ([1] ADV, [http 2004-10-03](http://www.lvm.bund.de/2004-10-03)). Für die eigene Verwendung stellen diese CD's ein integriertes GIS-Modul der Firmen Daimler-Benz Aerospace und Dornier zur Verfügung. Das Einzeichnen von Flächen und deren Berechnung wird dadurch möglich. Für die Kartenweitergabe an Dritte bedarf es allerdings der Zustimmung der jeweiligen Landesvermessungsverwaltung ([30] TKVV, 2000). In der Regel fallen hierfür Gebühren an. Weiterhin besteht die Möglichkeit, Kartenblätter 1:50.000 als digitale Rasterkarten zu erwerben. Die Kosten hierfür betragen ca. 100,- € pro Kartenblatt. Die Karten haben den Vorteil, dass sie optional aus bis zu 22 Einzel-layern aufgebaut sind (Grundriss, Höhenlinien, Gewässerkontur, Gewässerfläche, Wald (Vollton), Wald (Raster), Bebauungston Großstädte, Schrift, Schrift Gewässer, Schrift Europastraßen, Schrift Autobahnanschluss, Fläche Autobahn, Fläche Bundesstraßen, Fläche Straßen, Verkehrswege in Bau, Landes - und Kreisgrenzen, Grenzen Kreise + Verwaltungsgemeinschaften, Gemeindegrenzen, Schrift Landkreise der Nachbarländer, Schrift Verwaltungsgemeinschaften, Schrift der Gemeinden + Signatur (zu Gemeindegrenzen), Grenze + Schrift Nationalpark).

Analytische Durchführung:

Die Bestimmung der Einzugsgebietsgrenzen erfolgt auf Grundlage einfacher Regeln:

- Begonnen wird an dem Gewässerpunkt, für den das Einzugsgebiet zu ermitteln ist.
- Von dort aus wird ein Lot auf die nächste bergseitige Höhenlinie gefällt. Dieser Schritt wird so lange wiederholt, bis man am vermutlich höchsten Punkt des Einzugsgebietes angekommen ist (zwischen Sattelpunkten und auf Hochplateaus wird der wahrscheinlichste Verlauf angenommen).
- Anschließend wird wieder am Ausgangspunkt begonnen und die andere Hälfte des Einzugsgebietes nach den gleichen Regeln eingezeichnet.
- Zu beachten ist immer die Tatsache, dass fallender Regen zum Einzugsgebietsfußpunkt ablaufen muss. Durch gleichzeitige Betrachtung angrenzender Gewässer und deren vermutliche Einzugsgebiete wird diese Aufgabe erleichtert.

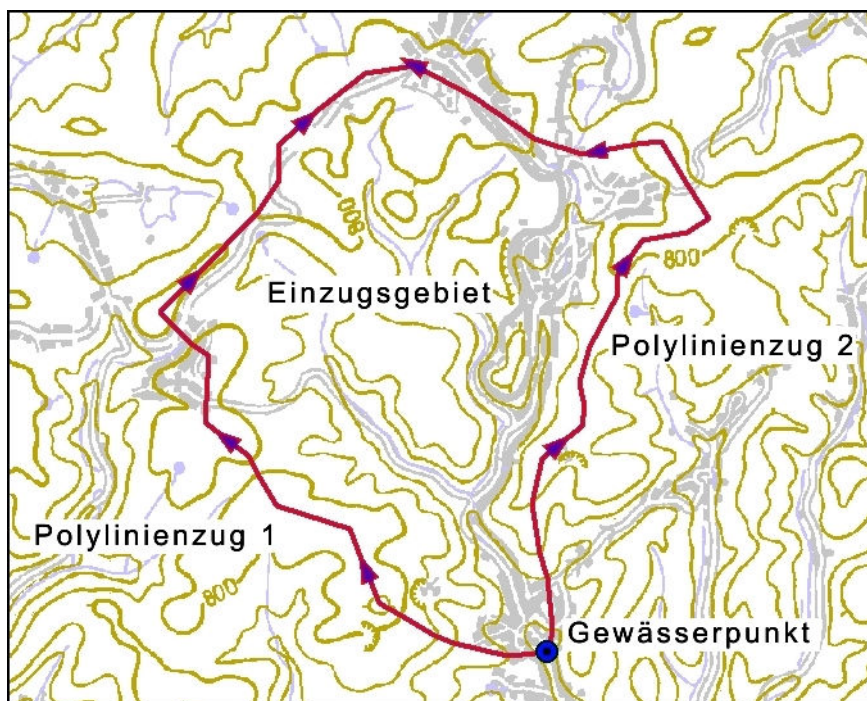


Abbildung 6: Vorgehensweise zur manuellen Abgrenzung von Einzugsgebieten

Technische Probleme ergeben sich aus der Tatsache, dass die Einzugsgebietsfläche durch diese Vorgehensweise aus zwei Teilen (einmal im Uhrzeigersinn und einmal entgegen gezeichnet) zusammensetzen ist. Die praktische Handhabung ist von der verwendeten Software abhängig. Eine Variante ist die Verwendung von Einzellinien, die anschließend zu einem geschlossenem Polylinienzug verbunden und in eine Fläche umgewandelt werden. Eine

andere Möglichkeit besteht in der Booleschen Addition von Einzelflächen oder der erneuten Abdigitalisierung durch ein Flächenthema.

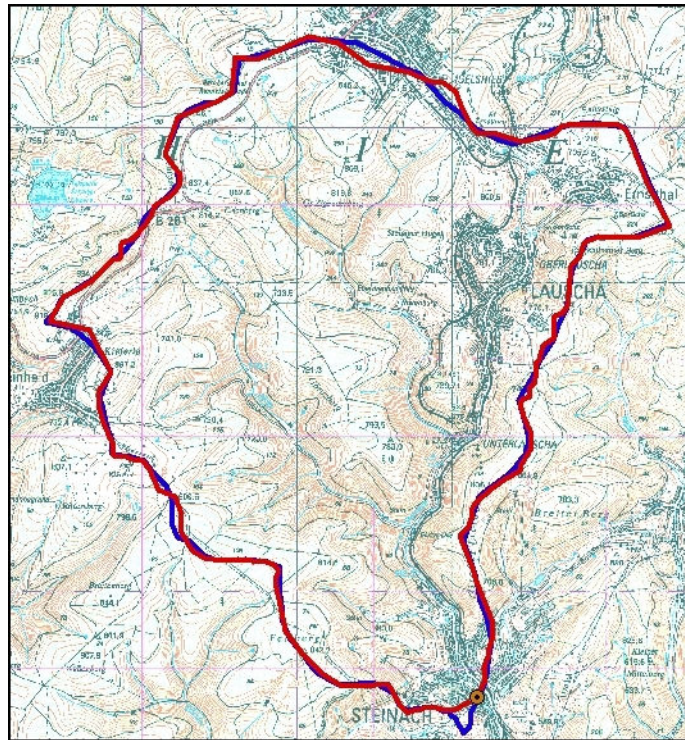


Abbildung 7: Ermittlung der Einzugsgebietsgrenzen des Pegels Steinach/Steinach durch das Staatliches Umweltamt Suhl (rote Polylinie) und R. Stahlmann (blaue Polylinie) anhand von Höhenlinien aus topographischen Karten.

Ermittelt durch	Ermittlung auf Grundlage topographischer Karten	Fläche
Staatliches Umweltamt Suhl	GIS des SUA Suhl, September 2004	37,851 km ²
Staatliches Umweltamt Suhl	älterer Wert für Pegelstatistik, wahrscheinlich durch Planimetrieren von Papierkarten ermittelt	37,200 km ²
R. Stahlmann	ArcView3.2, Topographische Karte 1:50.000, PD83	37,955 km ²

Tabelle 2: Ergebnisse der Einzugsgebietsermittlung aus Höhenlinien

Auswertung:

Trotz unabhängiger Abgrenzung durch unterschiedlicher Personen und Verfahren liegt die mittlere Abweichung der manuellen Einzugsgebietsermittlung bei nur etwa 1 % der Flächengröße. Vorteil dieses Verfahrens ist, dass es auf Plausibilitätsüberlegungen aufgebaut ist und Qualitätskontrollen durch Betrachten einfach durchzuführen sind. Für die Angabe der absoluten Genauigkeit dieses Verfahrens im Sinne von Metadaten ist zu beachten, dass Höhenlinien

aus älteren Kartenwerken durch Interpolation und Einschätzungen des jeweiligen Kartographen anhand einzelner Höhenmesswerte entstanden sind. Dies birgt einen gewissen Unsicherheitsfaktor, der aber meist unter 10 % der Flächengröße liegen dürfte.

5.2.2 Berechnung mittels Digitalem Höhenmodell

Digitale Höhenmodelle bilden das Relief der Erdoberfläche ab, indem sie die Geländeform z.B. durch ein regelmäßiges Punktgitter (X, Y, Z) beschreiben. Sie können aus Schichtlinien (eine effiziente Methode wird in [22] NETELER, 2000, S.87 dargestellt), aus überlappenden Luftbildern oder durch Radar- bzw. Laserdistanzmessungen aus Flugzeugen erzeugt werden ([9] FÜRST, 2004, S.200f). Letztere liefern zwar die genauesten Daten, durch die auf die Rohdaten angewendeten Filter können jedoch wichtige Informationen verloren gehen. An der Optimierung der Filteralgorithmen wird derzeit intensiv geforscht.

Aus dem DHM lassen sich noch weitere hydrologisch relevante Parameter ermitteln, wie z.B. Gefälle, Exposition und Fließwege.

Datengewinnung:

In Abhängigkeit von der Höhengenaugigkeit und der Rasterweite der Stützpunkte bietet die Thüringer Landesvermessung das DGM50, DGM25 und DGM10 an. DGM50 und DGM25 liegen für Thüringen flächendeckend vor. Das DGM10 ist derzeit nur für ausgewählte Gebiete erhältlich ([29] TLVERMA, ../atkis/digitalegelaendemodelle/content.html, 2004-09-28).

	DGM50	DGM25	DGM10
Rasterweite	25m x 25m	20m x 20m	10m x 10m
Genauigkeit	+/- 4 – 6 m	+/- 3 m	+/- 0,5 – 1 m
Geodätische Grundlagen	Koordinatensystem PD83, 3. bzw. 4. Meridianstreifen, Bessel-Ellipsoid, Abbildungsart Gauß-Krüger, Deutsches Haupthöhennetz 1992	wie vor	wie vor
Informationsgehalt	Koordinatentripel (X, Y, Z); keine Strukturinformationen	wie vor	wie vor

	DGM50	DGM25	DGM10
Gebiet	landesweit	landesweit	teilweise
Dateizuschnitt	entsprechend der Topographischen Karte 1:25.000	individuell	5km x 5km
Abgabeformat	ASCII oder GRID	wie vor	wie vor
Bereitstellungsgebühr [km ²]			
bis 5.000 km ²	1,50 €	3,00 €	30,00 €
für weitere 1-20.000 km ²	1,00 €	1,50 €	15,00 €

Tabelle 3: Von der Thüringer Landesvermessung angebotene Digitale Höhenmodelle

Für diese Arbeit fiel die Wahl auf das DGM25, da es sich einerseits um ein Gebiet mit hoher räumlicher Variabilität handelt (siehe auch [9] FÜRST, 2004, S.202f) und andererseits das DGM10 für dieses Gebiet noch nicht vorlag.

Analytische Durchführung:

Das Importieren von DHM's in ArcView kann eine zeitaufwändige Aufgabe sein, wenn das Format nicht direkt eingelesen werden kann und die Anzahl an Höhenpunkten sehr groß ist.

Im vorliegenden Fall wurde das DHM als ASCII-File im Format Rechtswert-Hochwert-Höheninformation, jeweils mit Leerzeichen getrennt, übergeben. Dezimaltrennzeichen war der Punkt. Da die Umwandlung dieser Tabelle zu einem Punkt-Thema und die anschließende Konvertierung in ein Grid zu aufwändig erschien, wurde der Weg über die Erzeugung eines ASCII-Rasters-Files gewählt. Dazu wurde der Z-Wert mit einer MS-Access™-SQL-Abfrage (SELECT [Z]*100 AS Z_Int FROM DGM25 ORDER BY DGM25.Y DESC, DGM25.X ASC;) aus der Grundtabelle isoliert, mit 100 multipliziert, um Integerwerte zu erhalten und mit folgenden Anfangszeilen versehen:

```
ncols 471          (Anzahl der Spalten)
nrows 551         (Anzahl der Reihen)
xllcenter 4433780 (Rechtswert des Zentrums der untersten linken Zelle)
yllcenter 5587400 (Hochwert des Zentrums der untersten linken Zelle)
cellsize 20       (Abstand der Zellzentren)
nodata_value -9999 (Wird bei No-Data-Werten eingetragen)
62511 (Z-Höhen in cm in Leserichtung links -> rechts und oben -> unten)
62406
etc.
```

Anschließend lässt sich das DHM problemlos importieren und im Map-Calculator wieder in ein Floating-Grid (Teilen durch 100) umwandeln.

Um nun das Einzugsgebiet ermitteln zu können, muss das DHM zuerst aufbereitet und korrigiert werden. Geländemodelle weisen meist kleinere Fehler auf, die im Zuge ihrer Erstellung entstanden sind. Dies sind neben Artefakten des Herstellungsprozesses meist Extrema aufgrund der großen Unterschiede zwischen der Rasterauflösung und der Breite von linearen Höhenstrukturen wie Gewässern oder Brücken, die letztendlich zu abflusslosen Senken oder kleinen Erhebungen führen. Dabei sind insbesondere abflusslose Senken als kritisch anzusehen, da sie zu einer Unterbrechung der Fließwege führen und somit die hydrologischen Berechnungen unbrauchbar machen ([24] SCHÄUBLE, 2004, S.4).

Damit durch die Korrektur möglichst wenig Informationen zerstört werden, müssen zuerst Art und Anzahl der Artefakte abgeschätzt werden. Dazu dient z.B. die ArcView3.x – Extension Hydrotools 1.0. Mit ihr kann man beispielsweise lokale Senken visualisieren:

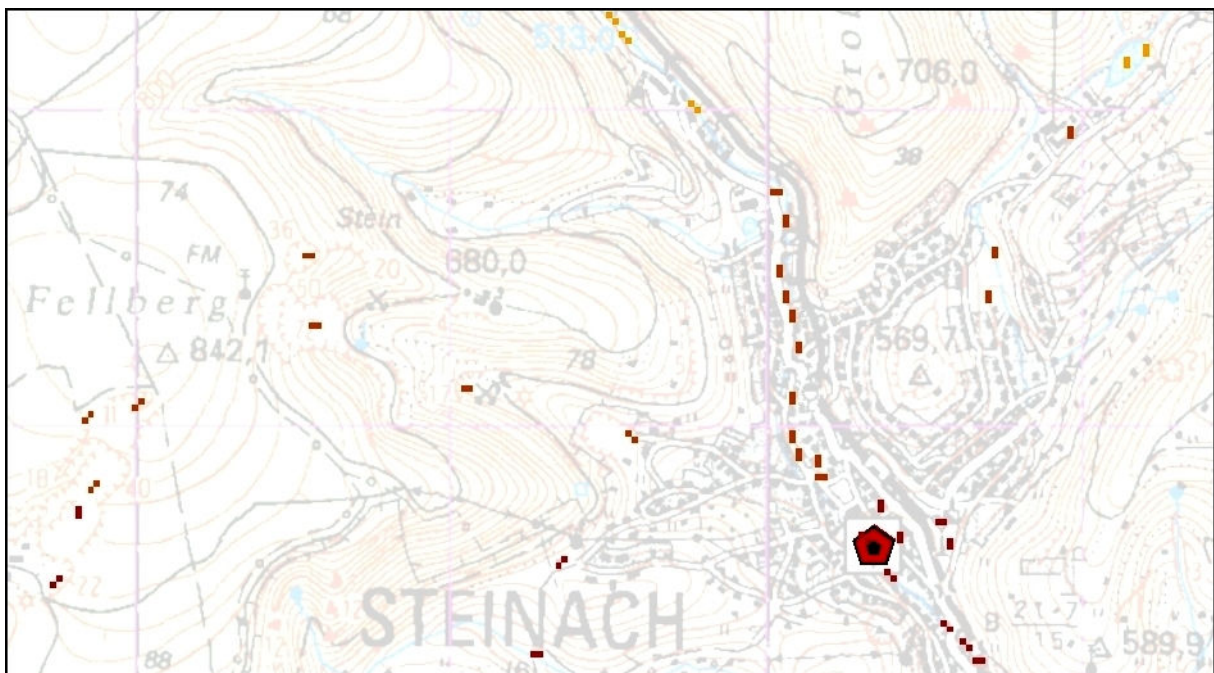


Abbildung 8: Lokale Senken im DGM25, ermittelt durch Hydrotools.avx

Zur Bereinigung dieser Senken gibt es grundsätzlich zwei Möglichkeiten: das Auffüllen der Senken oder das Absenken des in Fließrichtung liegenden Umlandes. Da die Senken in diesem Fall vereinzelt liegen, ist der Füllalgorithmus der Hydrotools vorzuziehen.

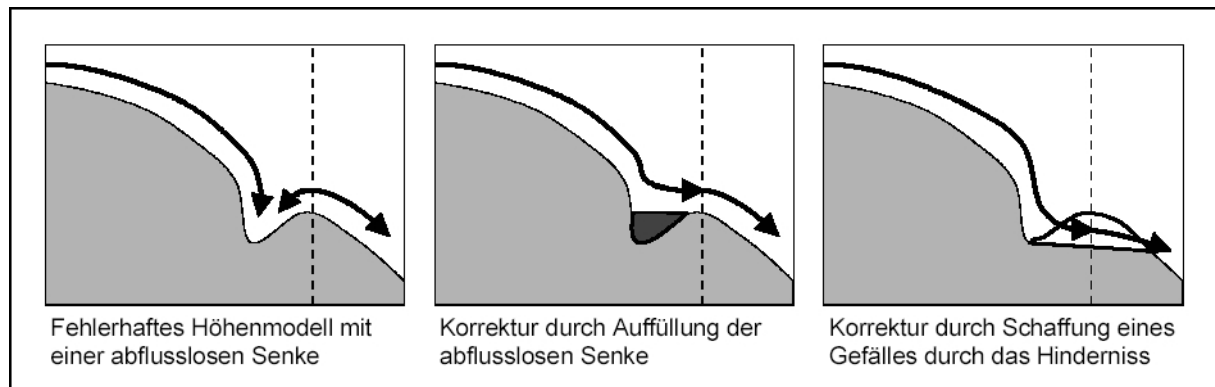


Abbildung 9: Abflusslose Senken in einem digitalen Höhenmodell und ihre Korrektur. Aus ([24] SCHÄUBLE, 2004, S.5)

Die Ermittlung der Einzugsgebietsgröße erfolgt in mehreren Schritten. Zuerst muss die Fließrichtung in den Rasterzellen bestimmt werden. Die am häufigsten angewandte Methode ist die Verwendung des D8-Algorithmus (Jenson and Domingue, 1988), der in ArcView mit dem Befehl `DHMGrid.FlowDirection(FALSE)` aufgerufen wird. Die Klammerangabe beeinflusst das Fließrichtungsverhalten der Randzellen des Grids (siehe auch Online-Hilfe von ArcView). Zu beachten ist, dass diese Berechnung nicht mit der Derive-Aspect-Berechnung des Spatial-Analysts gleichzusetzen ist. Der Algorithmus wertet nur die Höhen der unmittelbaren Nachbarzellen aus (daher D"8") und hat demzufolge den Nachteil, dass er dadurch nur Fließrichtungen in 45°-Schritten erlaubt. Als verbessertes Verfahren sind der D_{∞} -Algorithmus (= D_{inf} -Algorithmus, Tarboton, 1997) oder der Multiple-Flow-Algorithmus (Desmet & Govers, 1996) zu nennen ([9] FÜRST, 2004, S.208f u. [22] NETELER, 2000, S.140f). In den Hydrotools für ArcView stehen neben dem D8-, der Multiple-Flow- und ein kombinierter Algorithmus (MDD8) zur Verfügung. Bei letzterem bestimmt ein Schwellenwert den Wechsel von der Multiple-Flow- zur D8-Methodik ([24] SCHÄUBLE, 2004, S.6). Für die Berechnung der Einzugsgebietsgrenzen reicht der D8-Algorithmus aus, da Rasterzellen der Einzugsgebietsgrenze keinen Zufluss haben.

Für die eigentliche Abgrenzung des Einzugsgebiets stehen für ArcView3.x mehrere frei verfügbare Zusatzprogramme zur Verfügung. Z.B. gibt es einen Gridbefehl im Spatial Analyst™ (`dirGrid.Watershed (srcGrid)`, siehe auch Online-Hilfe von ArcView) und eine Hydrologic Modeling Sample Extension V.11 des Spatial Analysts™. Die Wahl in dieser Arbeit fiel jedoch auf das Zusatzprogramm `Wshed4.avx`, da dies das Einzugsgebiet als polygonales Flächenthema ermittelt und bereits einige Auswertungen wie Flächengröße oder Fließlänge durchführt.

Unter Verwendung des oben genannten DHM's, der Wshed4.avx und des D8-Algorithmus ergibt sich für den Pegel Steinach / Steinach eine Einzugsgebietsgröße von 37,796 km².

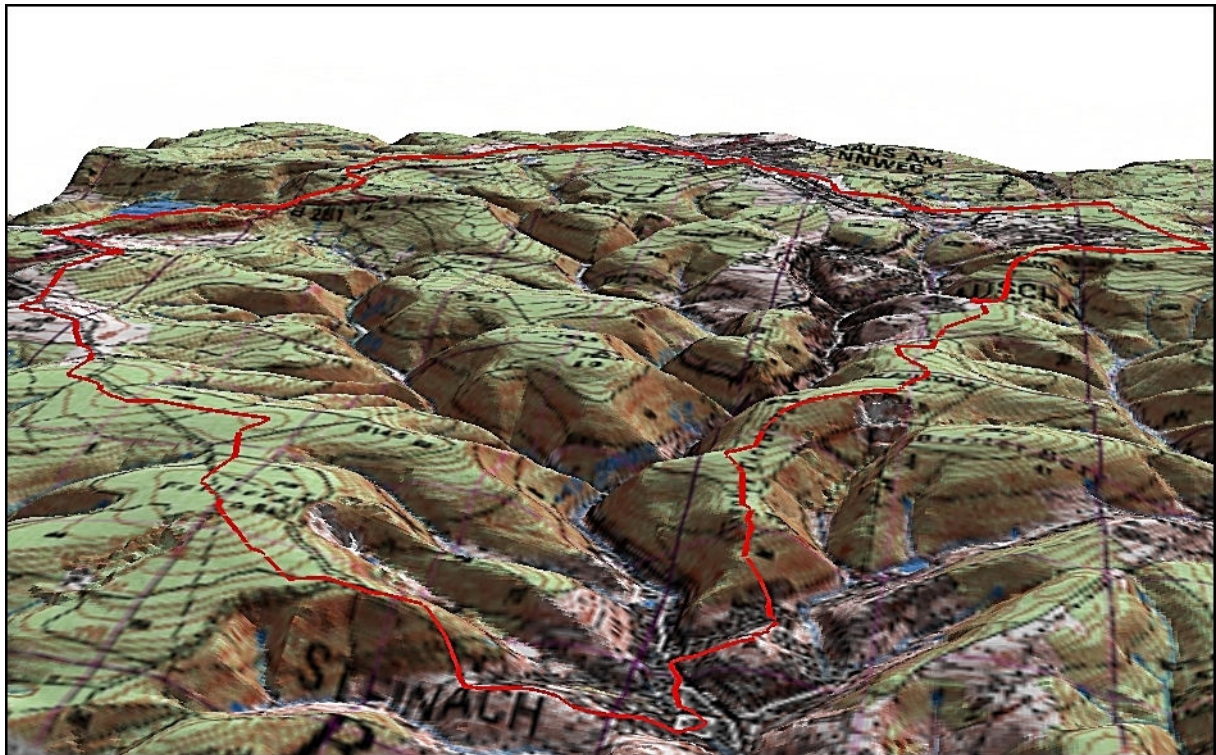


Abbildung 10: Perspektivische Ansicht des Einzugsgebietes Steinach/Steinach (rot umrandet) auf Topographischer Karte 1:50.000, Höheninformation DGM25 mit 1,5-facher Überhöhung. Darstellung durch ArcView 3D-Analyst V 1.0a.

Auswertung:

Aufgrund der Rasterweite des DGM25 von 20 m liegt die daraus resultierende Schwankungsbreite der berechneten Fläche des Einzugsgebietes etwa zwischen 37,492 km² und 38,100 km² (ermittelt durch Versetzen der berechneten Fläche um 10m nach innen und außen). Vergleicht man dieses Flächenintervall mit den durch Abdigitalisieren ermittelten Flächengrößen aus dem vorangegangenen Kapitel (37,851 km² und 37,955 km²), so kann man durchaus von adäquaten Ergebnissen sprechen.

Aufgrund der Bereitstellungsgebühren für das DGM25 und der erhöhten Bearbeitungszeit scheint die Verwendung von DHM's für die Einzugsgebietsermittlung nur sinnvoll, wenn das einmal korrigierte Höhenmodell mehrmals verwendet werden kann (z.B. zur Ermittlung von Teileinzugsgebieten) oder das verwendete Abflussmodell ein DHM explizit voraussetzt. Weitere Gründe können in der Ermittlung anderer hydrologischer Parameter liegen.

5.3 Gebietsrelief und mittleres Geländegefälle

Die Energie von Wasserteilchen setzt sich aus einer potentiellen und einer kinetischen Komponente zusammen. Wasserteilchen sind bestrebt einen Punkt niedrigerer potentieller Energie einzunehmen, womit Fließvorgänge zu begründen sind. Im Falle eines Regentropfens der auf einen Hang fällt bedeutet dies, dass er an potentieller Energie verliert und an kinetischer Energie gewinnt. Durch Reibungskräfte auf dem Fließweg wird die kinetische Energie zum Teil in Wärme umgewandelt. Aus diesen Zusammenhängen heraus ist die Bedeutung des Geländereiefs für den Abfluss leicht ersichtlich. Das Gefälle wird in der Hydrologie meist als einfacher Quotient von Höhendifferenz zu Längendifferenz angegeben oder verkürzt in ‰ (pro Hundert) bzw. ‰ (pro Tausend).

5.3.1 Ermittlung anhand von Höhenlinien

Die traditionelle Methode das Gefälle in einem Gebiet zu beschreiben ist ein Raster über eine topographische Karte zu legen (Richtgröße ca. 1 km² oder kleiner) und in den Kreuzungspunkten das Gefälle zu bestimmen. Dazu werden die beiden nächstgelegenen Höhenlinien der topographischen Karte in Fließrichtung verbunden, so dass entlang dieser Linie abfließendes Wasser direkt den Kreuzungspunkt passiert. Die erhaltenen Gefälle Stichproben werden arithmetisch gemittelt.

Als Analogie zu diesem Verfahren kann im GIS ein Linienthema über einer georeferenzierten topographischen Karte erzeugt werden. Beschreiben die Höhenlinien immer das gleiche Intervall, lässt sich das mittlere Gefälle leicht berechnen:

$$\frac{\Delta H \text{ zwischen 2 Isolinien}}{\left(\frac{\text{Summe der Längen aller Linien}}{\text{Anzahl der Linien}} \right)}$$

Die Anwendung dieses Verfahrens auf das Referenzeinzugsgebiet ergab folgende Werte:

Anzahl der Linien: 39 St
 Mittleres Geländegefälle: **21.5643 ‰**
 Maximale Linienlänge: 58.4454 m
 Minimale Linienlänge: 1.4916 m
 Standard-Abweichung: 13.6846 m

5.3.2 Berechnung mittels Digitalem Höhenmodell

Durch die Verwendung eines DHM's ist es möglich, wesentlich mehr Gefälleinformationen auszuwerten. Da die Standardgefälleberechnung in ArcView, welche über das Menü zu erreichen ist, Gradangaben liefert, ist das Gefälle in den Rasterzellen z.B. über den MapCalculator (Spatial Analyst™) zu bestimmen. Dazu eignet sich folgende Funktion:

```
[DHM_ursprung].Slope (1, true)
```

Die Angaben in Klammern beziehen sich auf einen globalen Multiplikator und der Unterscheidung zwischen Prozent und Grad (siehe auch Online-Hilfe von ArcView). Die beschriebene Funktion wertet die Höheninformationen der 8 angrenzenden Zellen aus.

Die Berechnung der Grid-Statistik innerhalb des Einzugsgebiets ergibt folgende Werte:

Anzahl der untersuchten Zellen: 94503 St
 Mittelwert des Geländegefälles: **24.38743 %**
 Maximaler Gefällewert: 114.04385 %
 Minimaler Gefällewert: 0.05001 %
 Standard-Abweichung: 18.37384 %

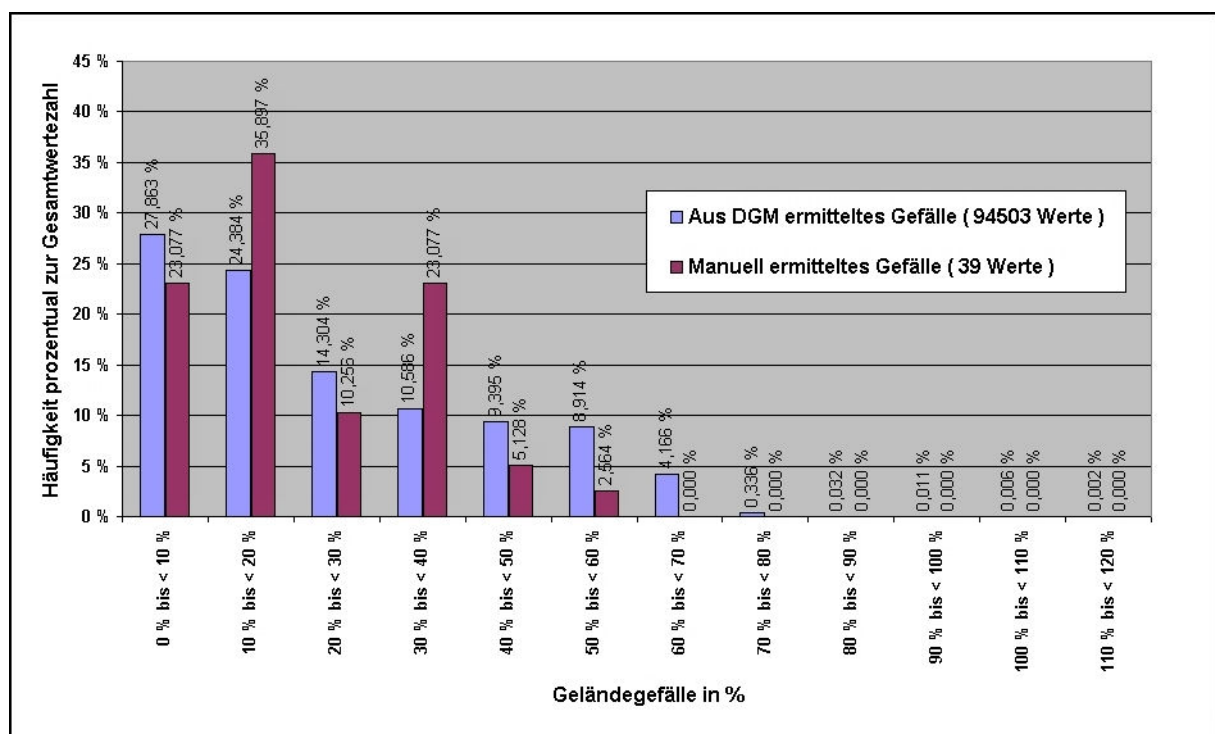


Abbildung 11: Histogramm der Höhenlinien- und DHM-Methode zur Bestimmung des mittleren Geländegefälles

Auswertung:

Unter der Berücksichtigung, dass die Untersuchung für nur ein Referenzeinzugsgebiet keinerlei gesicherte Vergleiche zulässt, ist dennoch festzuhalten, dass die Ergebnisse trotz der geringen Stichprobenzahl der Höhenlinienmethode nur um 2,8 % voneinander abweichen. Betrachtet man allerdings die Verteilungsfunktion der beiden Methoden, so sind die Schwächen der Höhenlinienmethode deutlich zu erkennen.

Unter Vorbehalt eines möglicherweise methodischen Fehlers durch den verwendeten Algorithmus, können durch die Verwendung von DHM's besser abgesicherte Werte des mittleren Geländegefälles bestimmt werden, was allein aus der hohen Stichprobenzahl zu begründen ist.

5.4 Gewässernetz

5.4.1 Bestimmung des längsten Fließweges anhand von Karten

Für viele Abflussmodelle muss der längste im Einzugsgebiet auftretende Fließweg ermittelt werden. Oft wird in diesem Zusammenhang von der Fließlänge des Hauptvorfluters bis zur Wasserscheide gesprochen. Dies muss jedoch nicht zwangsläufig dem längsten Fließweg entsprechen, wie im Referenzgebiet zu sehen ist. Der dort befindliche entfernteste Punkt liegt auf einer Erhöhung nahe der Einzugsgebietsgrenze.

Die übliche Verfahrensweise ist die Messung des Hauptvorfluters in einer topographischen Karte durch einen Bindfaden oder am PC durch Abdigitalisieren des Gewässers und anschließender Berechnung des Polylinienzugs. Ab der Quelle orientiert man sich an den Höhenlinien und schätzt den weiteren Verlauf bis zum entferntesten Punkt, der noch zur Quelle entwässert. Durch die zwei Verfahren entstanden folgende Messwerte:

Messen mit Bindfaden auf Papierkarte: 10.18 km

Abdigitalisierung und anschließende Längenberechnung: 11.15 km

5.4.2 Bestimmung des längsten Fließweges mittels DGM

Bei der Ermittlung des Einzugsgebiets mit dem Wshed4.avx Zusatzprogramm wird die Fließlänge bis zum entferntesten Punkt automatisch mitberechnet.

Als Ergebnisse erscheinen weiterhin "Eq-len[m]" und "Rel-len[m]" die sich durch Betrachtung des Quellcodes wie folgt erklären lassen:

```
Check = ( Perimeter * Perimeter ) - ( 16 * Area )
      if ( check < 0 ) then
          check = 0
      end
eqLen = ( Perimeter + check.Sqrt ) / 4
relLen = maxLength / ( Area.Sqrt )
```

Quellcode 1: Auszug aus der ArcView Extension WSHEd4.AVX, verändert

Die durch Wshed4.avx ermittelte Fließlänge des DGM25 beträgt 12,105 km, was einen fast 1km längeren Fließweg als durch die vorangegangene Methode bedeuten würde.

Um den Einfluss der Auflösung des DHM näher zu quantifizieren, wurde das vorhandene DHM in eine feinere und eine weitmaschigere Auflösung umgerechnet (10 m und 150 m Rasterweite, IDW-Verfahren mit 12 Nachbarn).

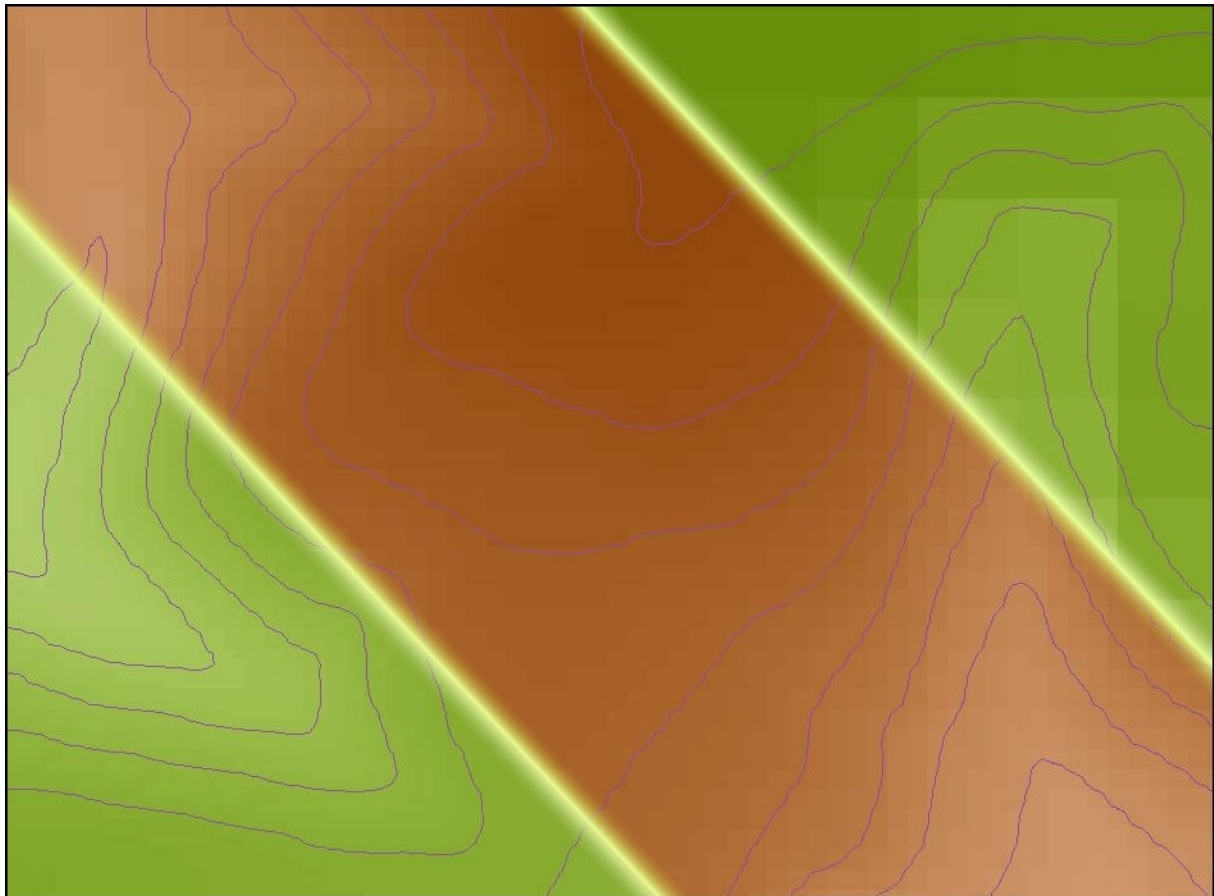


Abbildung 12: Veränderung der Auflösung des 20x20 m Ursprungs-DHM (Mitte, braun) durch Verdopplung der Auflösung auf 10x10m (grün, links) und Fünfteln auf 100x100m Rastergröße (grün, rechts). Darüber liegen Höhenkonturen, Höhendifferenz 10 m.

Bei der Berechnung der Fließlänge des DHM mit 150m-Rasterauflösung ergab sich eine Fließlänge von ca. 11.700 m, bei dem hochinterpoliertem Raster ergab sich eine Fließlänge von ca. 12.092m, was in etwa der Fließlänge der Ursprungs-Grids entspricht.

Zum einen bestätigt sich die Abhängigkeit der Fließlänge von der Auflösung ([9] FÜRST, 2004, S.203), zum anderen ist durch eine Hochinterpolation keine Verlängerung des Fließwegs durch fehlende zusätzliche Detailinformationen zu erreichen.

Auswertung:

Die Ermittlung der Fließlänge hängt überaus stark von der Methode und vom gewählten Maßstab ab. So ergab sich bei der Auswertung des DGM25 mit dem D8-Algorithmus eine Fließlänge von 12,105 km vom entferntesten Punkt bis zum Pegel.

Eine manuelle Abdigitalisierung des Fließweges und anschließendes Messen ergaben 11,150 km, eine Ermittlung mittels Bindfaden auf der topographischen Papierkarte 1:50.000 ergab nur ca. 10,180 km, was einer Abweichung von über 15 % entspricht. Es ist anzunehmen, dass der reale Fließweg sogar wesentlich größer als 12,1 km ist, da das einzelne Wasserteilchen vertikale Bewegungen im Boden und Gewässer durchläuft und die Strömung im Gewässer zwischen linken und rechten Ufer pendelt.

Die erhaltenen Unterschiede alarmieren um so mehr, da sich die Fließlänge unmittelbar auf die Berechnung des Gewässergefälles auswirkt. Ferner ist von vielen Modellen nicht bekannt, wie der Modellentwickler die Länge des Gewässers zur Erstellung seines Modells bestimmt hat.

5.4.3 Integrales Gewässergefälle

Um das mittlere Gewässergefälle zu beurteilen wäre ein erster denkbarer Ansatz die Höhendifferenz zwischen Pegel-Null und entferntestem Einzugsgebietspunkt durch die Fließlänge zu teilen. Dieser Ansatz berücksichtigt aber in keiner Weise Gefälleunterschiede während des Fließweges.

Deswegen muss vielfach das s.g. integrale, bzw. gewichtete Gefälle eines Gewässers bestimmt werden. Dazu wird eine Schnittfläche aus dem Gewässerlängsschnitt erzeugt und durch ein Dreieck gleicher Fläche und Basislinienlänge ersetzt. Das sich in dieser Dreiecksfläche ergebende Hypotenusengefälle entspricht dem integralen Gewässergefälle.

$$\text{Gefälle} = \frac{A \times 2}{(L)^2}$$

...wobei A gleich der durch den Gewässerlängsschnitt aufgespannten Fläche und L gleich der Gewässerlänge, gemessen in der Horizontalebene, entspricht.

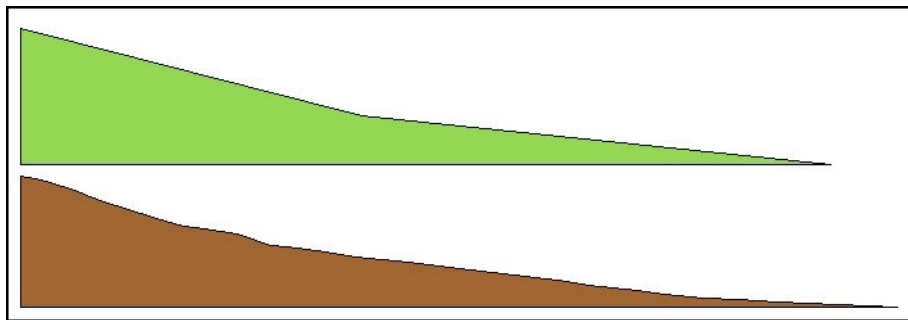


Abbildung 13: Gewässerlängsschnittflächen, oben durch Wahl eines Stützpunktes aus der topographischen Karte, unten durch Generierung eines Gewässerlängsschnittes im DHM. Das Darstellungsverhältnis Höhe zu Länge beträgt 5:1.

Die Ermittlung aus der topographischen Karte kann durch einen oder mehrere Stützpunkte erfolgen. Liegt ein DHM, vor so kann man z.B. in ArcView ein Profil entlang des Talweges generieren. Dazu eignen sich der 3D-Analyst und die Profil-Extractor-Erweiterung.

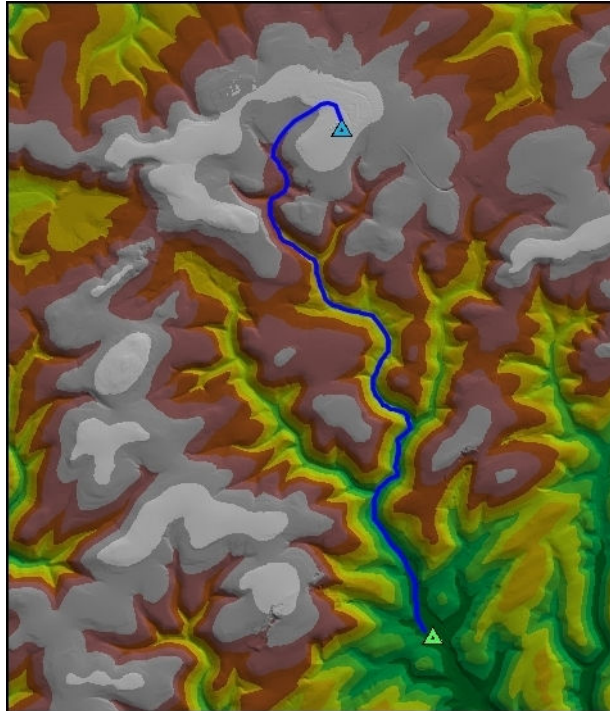


Abbildung 14: Erzeugung eines Gewässerlängsschnittes durch die Verwendung eines DHM's in ArcView. Die beiden Dreiecke symbolisieren den Basispunkt und den entferntesten Gewässerpunkt im Einzugsgebiet. Entlang der blauen Linie wird der Längsschnitt erzeugt. Das DHM ist von grün (tiefer gelegen) nach hellgrau (höher gelegen) eingefärbt.

Bei der Gefällebestimmung ergeben sich folgende Werte:

- anhand Topographischer Karte 1:50.000 mit einem Stützpunkt: 2,6632 %
- anhand DHM-Profil: 2,0814 %

Die Unterschiede ergeben sich zum Teil aus den, bei der Berechnung der Fließlänge diskutierten Phänomenen, zum anderen durch die Unterschlagung konkaver und konvexer Geländeformen bei nur einem Stützpunkt.

5.5 Landnutzung

Die Landnutzung bestimmt zu einem beträchtlichen Anteil das Abflussverhalten des Gebietsniederschlags, da der Gebietsrückhalt stark von den Strukturen und den Oberflächenrauigkeiten der Landschaft abhängt. Besonders bei kurzen bis mittellangen Regenereignissen haben Versiegelungsgrad und Waldanteil einen großen Einfluss auf die Form der Abflusswelle im Gewässer. Während ein hoher Versiegelungsgrad zu einem schnellen Gebietsabfluss mit hohem Abflussmaxima und kurzer Dauer führt, wirken raue Strukturen wie Wald abflusssäufend und führen zu einer flacheren, aber länger andauernden Abflusswelle. Sind Speichervolumen in der Landschaft bei länger anhaltenden Starkregen gesättigt, tritt dieser Einfluss zurück.

Abflussmodelle in denen Faktoren der Landnutzung einfließen, können dazu benutzt werden den Einfluss veränderter Landnutzung auf das Abflussverhalten zu prognostizieren.

Einen guten Ausgangspunkt zur digitalen Bestimmung der Landnutzung stellen die Daten des CORINE Land Cover Programms dar (<http://www.umweltbundesamt.de>).

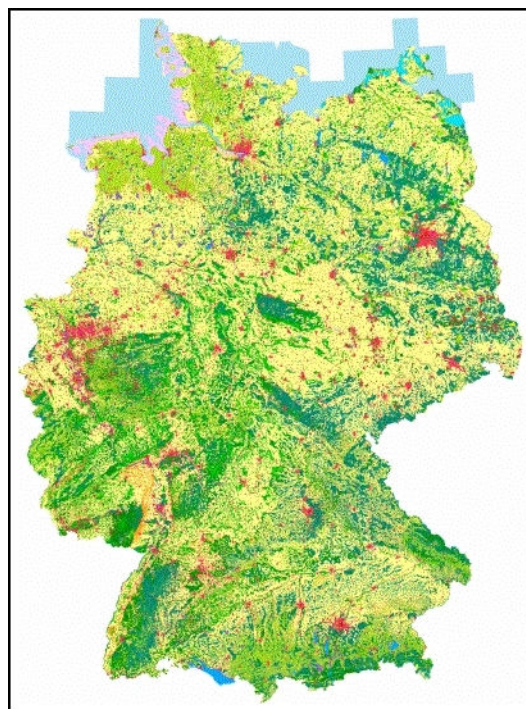


Abbildung 15: Die Landnutzung von Deutschland dargestellt durch das europäische CORINE Land Cover Programm.

http://www.caf.dlr.de/caf/anwendungen/projekte/projekte_nutzung/corine/x_images, 05.10.2004.

Die Kartierung der Landnutzungen ist ein Gemeinschaftsprojekt der Europäischen Union und stellt auf Basis von Landsat-7 Satellitenbildern eine europaweit harmonisierte Kartierung von 44 Landnutzungsklassen für Umweltbehörden und Planern zur Verfügung. Die Rasterdatensatz besitzt eine Auflösung von 250 m x 250 m (<http://www.umweltbundesamt.de>), was für das Referenzeinzugsgebiet ca. 600 Landnutzungszellen bedeuten würde. Vorteil dieser Daten ist die europaweit einheitliche Bestimmung der Landnutzungsklassen. Ein weiterer Vorteil ist die turnusmäßige Aktualisierung der Datensätze, somit werden Veränderungen in der Landnutzung dokumentiert, was im Hinblick auf statistische Pegelauswertungen eine verbesserte Genauigkeit bedeuten dürfte. Als nachteilig ist die Preispolitik zu sehen und die Tatsache, dass viele Abflussmodelle eigene differierende Einteilungen der Landnutzungen erfordern.

In dieser Arbeit wurde deshalb die Einteilung der Landnutzung auf die verwendeten Modelle abgestimmt und aus den Einzel-Layern "Wald Vollton" und "Bebauungston" der digitalen Topographischen Übersichtskarte Thüringens 1:250.000, PD83 generiert.

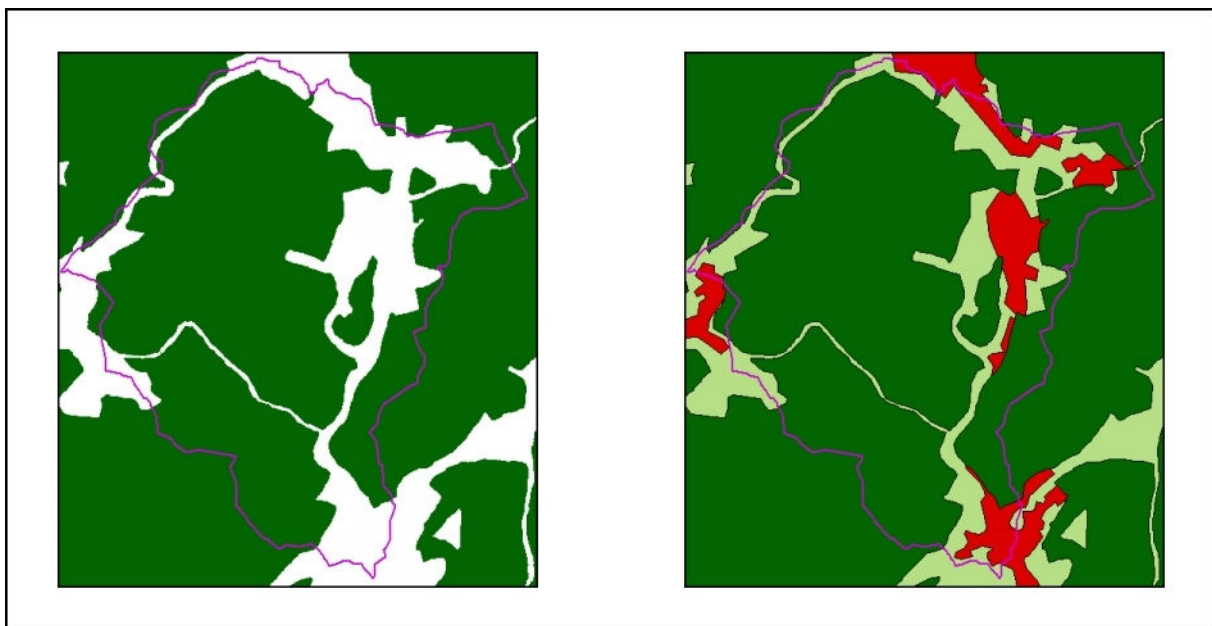


Abbildung 16: Überführung des Einzellayers "Wald Vollton" der digitalen Topographischen Übersichtskarte Thüringens 1:250.000, PD83, in eine dreistufige Landnutzungskarte (dunkelgrün = Wald, hellgrün = Dauergrünland und rot = Bebauung). Das magenta-farbene Einzugsgebiet dient zur Orientierung.

Da es sich im Referenzgebiet um eine Mittelgebirgsgegend handelt, in der aus klimatischen Gründen kein Ackerbau betrieben wird, wurden nur drei Klassen gebildet. Die Flächenanteile für das Einzugsgebiet berechnen sich zu: Wald = 74,8%, Grünland = 17,1% und Bebauung = 8,1%. Eine vorherige Schätzung ergab 80 % Wald und je 10 % für Grünland und Bebauung.

5.6 Boden

Der Boden und seine Beschaffenheit haben einen erheblichen Einfluss auf den Abflussprozess. Dabei ist sein Durchlässigkeitsbeiwert ebenso entscheidend wie seine Mächtigkeit, Grundwassernähe und sein Ausgangszustand (Wassersättigung, durch Bodenfrost verschlossene Kapillaren). Der Boden beeinflusst die Vegetation und bestimmt indirekt die Landnutzung, da z.B. auf den für Ackerbau ungeeigneten Böden in Deutschland meist Waldnutzung vorherrscht. In vielen Modellen finden Bodenparameter Eingang. Der Mehrwert durch den GIS-Einsatz ist bei einfachen Blockmodellen hauptsächlich in der objektiven Übersetzung von vorhandenen Bodenkarten in die Eingangsparameter des Modells zu suchen. Bei stärker detaillierten Niederschlags-Abfluss- oder Wasserhaushaltsmodellen werden Versickerung und Grundwasserströme nachmodelliert.

Eine flächendeckende Aussage über die Beschaffenheit der oberen Bodenschichten in Thüringen liefert die Bodengeologische Übersichtskarte Thüringens im Maßstab 1:100.000. Sie entstand aus einer Zusammenfassung vorhandener Unterlagen aus den Bereichen Geologie, Bodenkunde und Landwirtschaft und wurde in Arbeitskarten 1:25.000 vorgezeichnet und koloriert. Diese Karten sind sowohl aufgrund Ihres Maßstabs, als auch aufgrund ihrer kurzen Herstellungszeit als Konzept-Werk anzusehen, das jedoch für viele Modelle mehr als ausreichend erscheint ([23] RAU, 2000, S.7).

Zur digitalen Bearbeitung für diese Arbeit wurden die betreffenden 4 Arbeitskarten 1:25.000 (das Einzugsgebiet liegt genau auf einem Kartenschnitt) eingescannt und georeferenziert. Dabei sind keine größeren Probleme zu erwarten, da die Arbeitskarten bereits im PD83 vorliegen. Um die Karten auswerten zu können, müssen sie abdigitalisiert werden, da durch die Buntstift-Koloration mit verschiedenen Schraffurmustern eine Bildanalyse als ungeeignet erscheint.

Im Bereich des Referenzgebiets liegen 11 Leitbodenformen vor. Als Vorbereitung für die Abflussmodellierung in den Modellen "Lutz" und "IHW-Abfluss", werden Ihnen die Buchstaben A bis D zugeordnet. Wobei A dem höchsten Rückhaltevermögen und D dem geringsten Rückhaltevermögen entspricht, welches zum größten Abfluss führt.

Auesedimente

- h1g Lehm, tonig – Schwarzgley (über Mergel, Ton Torf, stark vernässt), Kennung D
- h2 Lehm – Vega (Auelehm), Kennung D
- h3l Lehm – Vega (Nebentäler), Kennung C

Jungpaläozoische bis mesozoische Substrate

- k3 Lehm steinig (Zechsteinsedimente), Kennung D
- s1 Sandiger Lehm (vorwiegend Sedimente des Unteren Buntsandsteins), Kennung C
- s2 Lehmiger Sand (vorwiegend Sedimente des Mittleren Buntsandsteins), Kennung B

Jungpräkambrische bis altpaläozoische Substrate

- lg1 Lehm, steinig, grusig (Schieferschutt), Kennung A
- lg2 Sandiger Lehm, steinig (Schiefer-Quarzit-Schutt), Kennung B
- lg3 Lehm, steinig, grusig (Schiefer-Diabas-Schutt), Kennung C
- lg4 Skelettboden, lehmig (Schieferschutt der Steilhänge), Kennung A
- lg5 Lehm, tonig-Staugley (Schieferzersatz), Kennung D

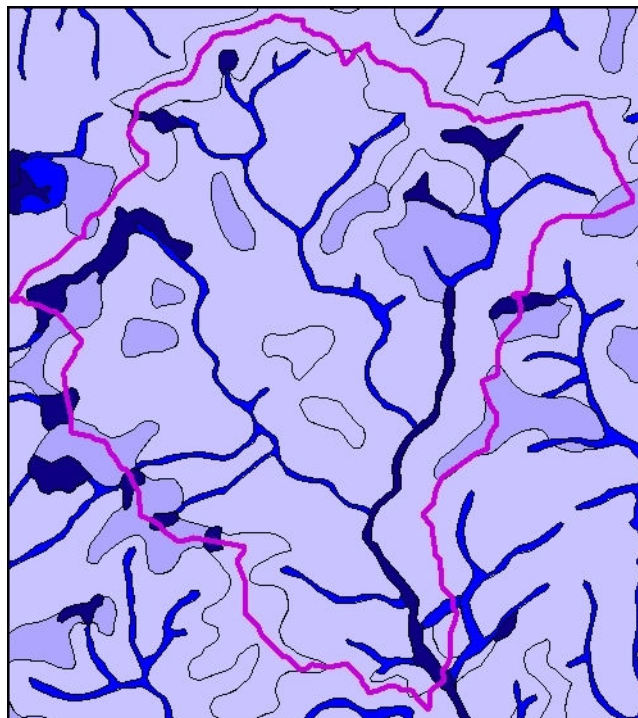


Abbildung 17: Einteilung der 11 im Gebiet vorkommenden Leitbodenformen in 4 Klassen als Vorbereitung zur hydrologischen Modellierung. (Hellblau entspricht dem größten Rückhaltevermögen, dunkelblau dem geringsten). Das magenta-farbene Einzugsgebiet dient zur Orientierung.

5.7 Niederschlag

Der Abfluss in einem Gewässer wird unter anderem durch Art, Menge und Verteilung des Gebietsniederschlags bestimmt. Dabei spielen neben den Klimazonen auch der Abstand zum Meer in Hauptwindrichtung und das Relief eine entscheidende Rolle. Da diese Faktoren räumlich differieren müssen Abflussmodelle regionalisiert werden, um den unterschiedlichen klimatischen Einflüssen Rechnung zu tragen.

5.7.1 Statistische Niederschlagswerte

Um die Auswirkungen dieser Einflüsse für Planungsaufgaben zur Verfügung zu stellen, wurde eine Arbeitsgemeinschaft von Hydrometeorologen und Wasserwirtschaftlern gebildet. Sie quantifizierte die Eintrittswahrscheinlichkeiten von Gebietsniederschlägen für Deutschland und veröffentlichte den Kostra-Niederschlagsatlas (Kostra = Koordinierte Starkniederschlags-Reionalisierungs-Auswertung).

Der Kostra-Atlas enthält 52 regionalisierte Karten mit Starkniederschlagshöhen. Darin werden Regenmengen in [mm/m²] in Abhängigkeit der Regendauer und der Wiederholungszeit dargestellt. Dies erfolgt in Form einer Deutschlandkarte, über die ein regelmäßiges Raster mit einer Zellengröße von 71,5km² gelegt ist. Die Rasterzellen sind aufgrund einer 10 bis 13-stufigen Skala eingefärbt, anhand derer aus der Legende die Niederschlagsspanne in mm abgelesen werden kann. Die Ergebnisse beruhen auf der Auswertung von punktuell ermittelten Starkniederschlagshöhen verschiedener Regendauer und Jährlichkeit, die in eine flächige Karte überführt wurden ([7] DWD, 1997, S.7f).

Analytische Durchführung

Da die Anzahl der Karten nicht ausreichend ist, um alle benötigten Varianten von Regendauer und Wiederholungszeit abzubilden, liegt dem Kostra-Atlas ein kleines Programm bei, das zur Interpolation der fehlenden Werte benutzt werden kann. Dazu sind von 12 Karten die entsprechenden Werte zu ermitteln und in das Programm einzutragen. Es erstellt daraus eine Regendauer -Wahrscheinlichkeitsmatrix mit 144 Werten.

Da das Referenz-Einzugsgebiet auf mehreren Kostra-Rasterfeldern liegt müssen als Ausgangsbasis flächengemittelte Werte berechnet werden. Dazu ist der Anteil der Einzugsgebietsfläche zu ermitteln, der im jeweiligen Rasterfeld liegt und mit der jeweiligen Wertespanne zu multiplizieren. Aus der Summe der einzelnen Anteile werden dann zwei Regendauer-Wahrscheinlichkeits-Matrizen erstellt (Minimal- und Maximalniederschläge), welche die Eingangsdaten zur hydrologischen Berechnung bilden.

Die Durchführung erfolgt durch die Georeferenzierung der 12 Karten, um sie in der gleichen Projektion wie das Einzugsgebiet vorliegen zu haben. Die Flächenanteile des Einzugsgebiets, die auf das jeweilige Rasterfeld der Kostra-Karten fallen, können danach bestimmt werden.

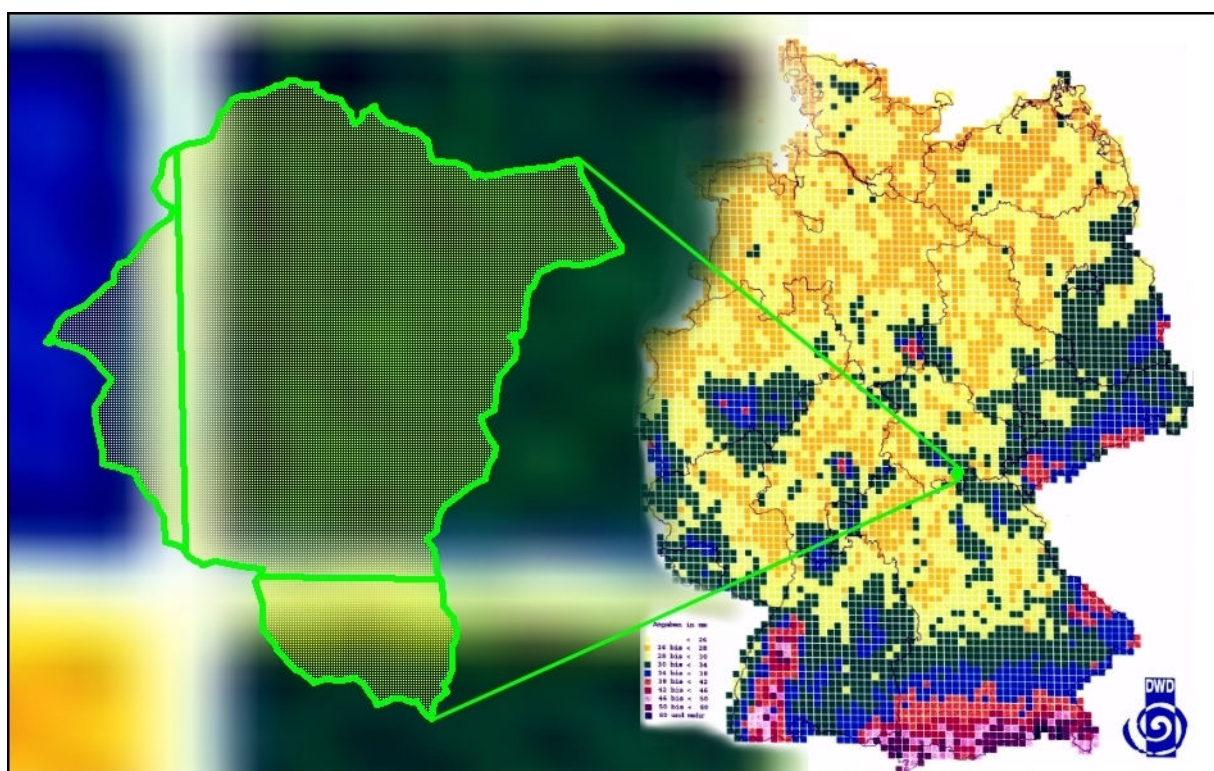


Abbildung 18: Aufteilung des Einzugsgebiets Steinach/Steinach zur Ermittlung der Starkniederschlags-höhen in Abhängigkeit der Wiederholungszeit. Niederschlagsverteilungskarte 12 Stundenregen mit ein-jährlicher Überschreitungswahrscheinlichkeit aus ([7] DWD, 1997).

Über folgende Tabelle werden die flächengewichteten Von und Bis- Niederschläge für das Einzugsgebiet ermittelt.

Quadrant Flächenanteil		43/61		44/61		44/62		Gesamtfläche	
		12,00%		78,00%		10,00%		Gemittelt	
		Von	Bis <	Von	Bis <	Von	Bis <	Von	Bis <
D = 15 min	T = 1a	10,50	11,00	11,00	11,50	11,00	11,50	10,94	11,44
D = 15 min	T = 100a	28,00	30,00	28,00	30,00	26,00	28,00	27,80	29,80
D = 60 min	T = 1a	16,00	17,00	18,00	19,00	18,00	19,00	17,76	18,76
D = 60 min	T = 100a	46,00	50,00	58,00	62,00	58,00	62,00	56,56	60,56
D = 12 h	T = 1a	34,00	38,00	30,00	34,00	30,00	34,00	30,48	34,48
D = 12 h	T = 100a	60,00	70,00	70,00	80,00	80,00	90,00	69,80	79,80
D = 24 h	T = 1a	40,00	50,00	40,00	50,00	35,00	40,00	39,50	49,00
D = 24 h	T = 100a	80,00	100,00	80,00	100,00	100,00	120,00	82,00	102,00
D = 48 h	T = 1a	50,00	60,00	50,00	60,00	40,00	50,00	49,00	59,00
D = 48 h	T = 100a	110,00	130,00	90,00	110,00	110,00	130,00	94,40	114,40
D = 72 h	T = 1a	60,00	70,00	50,00	60,00	50,00	60,00	51,20	61,20
D = 72 h	T = 100a	120,00	140,00	120,00	140,00	120,00	140,00	120,00	140,00

Tabelle 4: Ermittlung der arithmetisch flächengemittelten Eingabewerte für KOSTAB.EXE.

Mit diesen Werten kann anschließend durch das dem Kostra-Atlas beiliegende Programm KOSTAB.EXE die Regendauer -Wahrscheinlichkeitsmatrix berechnet werden:

Niederschlagshöhen und -spenden für das ausgewählte Rasterfeld													
T	I	2.		5.		10.		20.		50.		100.	
	I	hN	RN	hN	RN	hN	RN	hN	RN	hN	RN	hN	RN
5 min	I	7.9	263.1	9.6	321.5	11.0	365.6	12.3	409.8	14.0	468.2	15.4	512.4
10 min	I	10.6	176.2	13.2	220.4	15.2	253.8	17.2	287.3	19.9	331.5	21.9	364.9
15 min	I	12.6	139.5	15.9	177.1	18.5	205.6	21.1	234.0	24.4	271.6	27.0	300.0
20 min	I	14.2	118.4	18.2	151.9	21.3	177.2	24.3	202.5	28.3	236.0	31.4	261.3
30 min	I	16.9	94.0	22.0	122.4	25.9	144.0	29.8	165.5	34.9	194.0	38.8	215.5
45 min	I	20.2	74.7	26.7	98.9	31.6	117.2	36.6	135.5	43.1	159.7	48.1	178.0
60 min	I	22.9	63.5	30.6	85.1	36.5	101.4	42.4	117.7	50.1	139.3	56.0	155.6
90 min	I	24.5	45.4	32.3	59.8	38.2	70.6	44.0	81.5	51.8	95.9	57.7	106.8
2 h	I	25.8	35.8	33.5	46.6	39.4	54.7	45.3	62.9	53.0	73.7	58.9	81.8
3 h	I	27.7	25.7	35.5	32.9	41.4	38.3	47.2	43.7	55.0	50.9	60.9	56.3
4 h	I	29.2	20.3	37.0	25.7	42.8	29.7	48.7	33.8	56.5	39.2	62.3	43.3
6 h	I	31.5	14.6	39.2	18.2	45.1	20.9	51.0	23.6	58.7	27.2	64.6	29.9
9 h	I	34.0	10.5	41.7	12.9	47.6	14.7	53.5	16.5	61.2	18.9	67.1	20.7
12 h	I	35.9	8.3	43.6	10.1	49.5	11.5	55.4	12.8	63.1	14.6	69.0	16.0
18 h	I	40.7	6.3	48.8	7.5	55.0	8.5	61.2	9.4	69.3	10.7	75.5	11.7
24 h	I	45.5	5.3	54.0	6.3	60.5	7.0	67.0	7.8	75.5	8.7	82.0	9.5
48 h	I	55.8	3.2	64.7	3.7	71.5	4.1	78.3	4.5	87.2	5.0	94.0	5.4
72 h	I	61.4	2.4	75.1	2.9	85.5	3.3	95.9	3.7	109.6	4.2	120.0	4.6

T - Wiederkehrzeit (in a): mittlere Zeitspanne in der ein Ereignis einen Wert einmal erreicht oder überschreitet

D - Niederschlagsdauer einschließlich Unterbrechungen (in mm, h)

hN - Niederschlagshöhe (in mm)

RN - Niederschlagsspende (in l/(s*ha))

Tabelle 5: Minima der Niederschlagshäufigkeiten in Abhängigkeit der Wiederkehrzeit. Ergebnistabelle aus KOSTAB.EXE, gekürzt und verändert.

Niederschlagshöhen und -spenden für das ausgewählte Rasterfeld

T	I	2.		5.		10.		20.		50.		100.	
	I												
D	I	hN	RN	hN	RN	hN	RN	hN	RN	hN	RN	hN	RN
5 min	I	8.8	294.3	10.7	355.3	12.0	401.5	13.4	447.6	15.3	508.6	16.6	554.8
10 min	I	11.6	194.0	14.4	240.6	16.5	275.8	18.7	311.1	21.5	357.6	23.6	392.9
15 min	I	13.7	152.3	17.3	192.1	20.0	222.2	22.7	252.3	26.3	292.1	29.0	322.2
20 min	I	15.4	128.4	19.7	164.0	22.9	190.9	26.1	217.9	30.4	253.4	33.6	280.4
30 min	I	18.2	101.2	23.7	131.6	27.8	154.6	32.0	177.5	37.4	207.9	41.6	230.9
45 min	I	21.6	79.8	28.6	105.8	33.9	125.4	39.2	145.1	46.2	171.0	51.5	190.7
60 min	I	24.3	67.6	32.7	90.8	39.0	108.3	45.3	125.9	53.7	149.1	60.0	166.7
90 min	I	26.4	48.8	34.8	64.5	41.2	76.3	47.6	88.1	56.1	103.8	62.4	115.6
2 h	I	27.9	38.8	36.5	50.6	42.9	59.6	49.3	68.5	57.9	80.4	64.3	89.3
3 h	I	30.4	28.1	39.0	36.1	45.5	42.1	52.0	48.2	60.6	56.1	67.1	62.2
4 h	I	32.2	22.4	40.9	28.4	47.5	33.0	54.1	37.5	62.7	43.6	69.3	48.1
6 h	I	35.1	16.3	43.9	20.3	50.5	23.4	57.2	26.5	66.0	30.5	72.6	33.6
9 h	I	38.3	11.8	47.2	14.6	53.9	16.6	60.6	18.7	69.5	21.5	76.2	23.5
12 h	I	40.8	9.4	49.7	11.5	56.5	13.1	63.3	14.6	72.2	16.7	79.0	18.3
18 h	I	48.9	7.5	58.6	9.0	66.0	10.2	73.4	11.3	83.1	12.8	90.5	14.0
24 h	I	57.0	6.6	67.5	7.8	75.5	8.7	83.5	9.7	94.0	10.9	102.0	11.8
48 h	I	67.3	3.9	78.2	4.5	86.5	5.0	94.8	5.5	105.7	6.1	114.0	6.6
72 h	I	72.9	2.8	88.6	3.4	100.5	3.9	112.4	4.3	128.1	4.9	140.0	5.4

T - Wiederkehrzeit (in a): mittlere Zeitspanne in der ein Ereignis einen Wert einmal erreicht oder überschreitet

D - Niederschlagsdauer einschließlich Unterbrechungen (in mm, h)

hN - Niederschlagshöhe (in mm)

RN - Niederschlagsspende (in l/(s*ha))

Tabelle 6: Maxima der Niederschlagshäufigkeiten in Abhängigkeit der Wiederkehrzeit. Ergebnistabelle aus KOSTAB.EXE, gekürzt und verändert.

5.7.2 Regenfelder und Wetterradar

Die meisten Modelle gehen von einer gleichmäßigen Beregnung des Einzugsgebietes aus. Speziell für kontinuierliche, physikalisch basierte Wasserhaushaltsmodelle (siehe auch Kapitel 6.2 Taxonomie der Abflussmodelle, S.42f), ist es jedoch unumgänglich, den tatsächlich fallenden Regen in einem Gebiet auszuwerten. Allein durch Regenmess-Stationen ist dies nur bedingt möglich, da sie nur stichprobenhaft das tatsächliche Regenfeld beschreiben. Durch geostatistische Verfahren wie Kirging mit Zusatzinformationen durch das Relief ([9] FÜRST, 2004, S.186) lassen sich die Werte verbessern, bleiben jedoch unsicher.

Eine Möglichkeit Regenfelder zu quantifizieren ist die Kombination von Regenmess-Stationen und Radar-Regenmessung, die für Deutschland kontinuierlich und flächendeckend vorliegt. Dabei werden die Regenmesswerte benutzt um die Radarrohdaten zu eichen, woraus sich der zeitliche Verlauf des Gebietsniederschlags exakter bestimmen lässt.

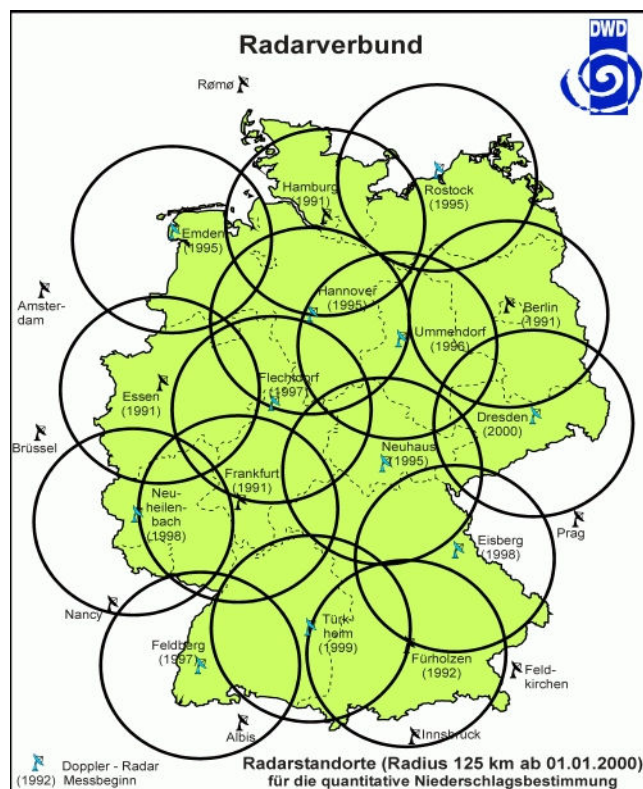


Abbildung 19: Radarstationen für die quantitative Niederschlagsmessung in Deutschland. Internet <http://www.dwd.de/de/Funde/Fern/Radar/radstand.htm>, 15.08.2004.

6 Abflussmodelle

6.1 Bedeutung von Abflussmodellen

Zur Lösung ingenieurhydrologischer Probleme werden konkrete Ausgangsparameter benötigt. Dies ist spätestens bei der Ausführungsplanung unumgänglich, auch wenn die quantifizierenden Aussagen prinzipbedingt nur ungenau möglich sind. Das dabei entstehende Restrisiko, mit dem wir es in vielen Bereichen unseres Lebens zu tun haben, ist abzuschätzen und gesellschaftlich abzustimmen.

Um nun zu konkreten Aussagen zu gelangen, werden natürliche Prozesse in mathematischen Modellen nachgebildet. Aufgrund der enormen Komplexität und der Interaktion der beteiligten Einflussfaktoren sind Modelle immer mit Abstraktionen unterschiedlichster Ausprägung verbunden. Das Ziel kann also nur sein, die für die Fragestellung ausreichende Genauigkeit zu erreichen. Man konzentriert sich deshalb bei der Modellierung auf die für wesentlich gehaltenen Einflussfaktoren und versucht bei der *Prozessanalyse* ihre Funktions- und Wirkungsweise zu verstehen ([16] LECHER, 2001, S.321f). Die Nutzung des entwickelten Modells wird dann als *Synthese* bezeichnet ([5] DVWK 113, 1990, S.III).

6.2 Taxonomie der Abflussmodelle

6.2.1 Klassifikation nach hydrologischen Dimensionen

Hydrologische Prozesse sind 5-dimensional ([9] FÜRST, 2004, S.145f). Je nach verwendetem Modell können die drei Dimensionen des Raumes, die Zeit und die Auswertung des Zufalls nach stochastischen Methoden analytischer Bestandteil sein:

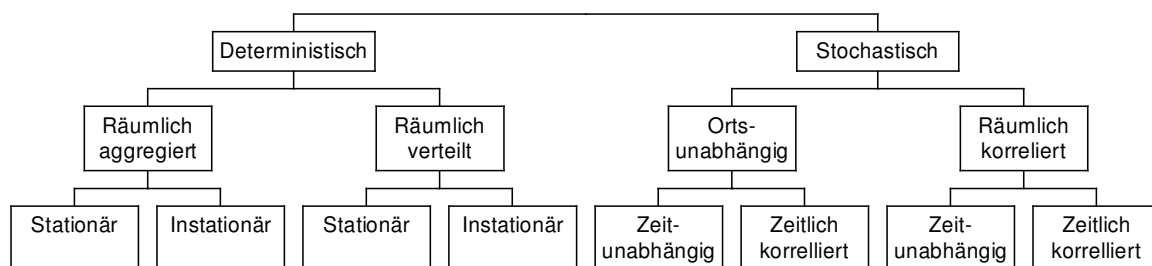


Abbildung 20: Abflussmodelle als Funktion von Zufall, Raum und Zeit

6.2.1.1 Die Dimension Zufall

Seit der wissenschaftlichen Beschäftigung mit fraktalen Erscheinungen in der Natur werden immer mehr Phänomene bekannt, bei denen sehr kleine, mitunter nicht mehr messbare Änderungen an Variablen zu sehr großen, z.T. unvorhersagbaren Auswirkungen führen. Somit ist nach heutigem Kenntnisstand die Wahrscheinlichkeitstheorie das einzige vernünftige mathematische Hilfsmittel um das Unbekannte abzubilden. Da es sich bei hydrologischen Ereignissen um zyklische, jedoch nicht um periodische Phänomene handelt, ist dem Problem am ehesten mit den Methoden der Skaleninvarianz zu begegnen ([18] MANDELBROT, 1987, S.215).

Die Berücksichtigung des Zufalls der Systemvariablen, als auch des Systemverhaltens findet deshalb Eingang in die hydrologische Modellierung. Man unterscheidet:

Deterministisch: Die im Modell durch mathematische Gleichungen simulierten Prozesse werden eindeutig abgebildet. Die zufälligen Schwankungen der Eingangsgrößen werden nicht berücksichtigt.

Stochastisch: Anhand stichprobenartig vorhandener Daten = Zufallsvariablen (z.B. tägliche Pegelmessungen oder Niederschlagsmessungen von 1954 bis heute) werden unter Verwendung statistischer Verfahren kontinuierlich verlängerte Datenreihen (s.g. Zeitreihen) gebildet. Somit kann man, ausgehend von einer nur kleinen Datenbasis, umfassende Eingabeparameter generieren. Die Dimension Zufall kann Bestandteil der Eingabedaten, des Systems und / oder des Ergebnisses sein. Ein Ergebnis könnte z.B. folgendermaßen aussehen: *Die Wahrscheinlichkeit, dass sich der 5-jährliche Abfluss an Gewässerstation XY zwischen 14,8 und 15,2 m³/s befindet, liegt bei 95 %.* Es wird davon ausgegangen, dass es auch in Zukunft nicht möglich sein wird, Ergebnisse "exakt" zu ermitteln, jedoch wird die Wahrscheinlichkeit eines bestimmten Ergebnisses hochgenau berechnet werden können.

6.2.1.2 Die Dimensionen des Raums

Die räumliche Variabilität der abflusswirksamen Parameter wie Gefälle, Landnutzung und Bodeneigenschaften ist offensichtlich und deren Auswertung und Abbildung eine der Stärken von GIS. Die Art und Weise wie räumlich-heterogene Daten Eingang in die Abflussberechnung finden ist jedoch unterschiedlich implementiert und kann zur Gliederung der Abflussmodelle verwendet werden. Eine zunehmende räumliche Gliederung der Modellstrukturen mit Zunahme vorhandener hochauflösender Ausgangsdaten ist zu verzeichnen.

Räumlich aggregierte = Block-Modelle: Dabei werden repräsentative Mittelwerte der räumlich variablen Parameter für das gesamte Untersuchungsgebiet verwendet. Führt man sich vor Augen, dass sich viele Parameter wie Gefälle oder Bodenparameter mit zunehmender Fließlänge ändern, so kann die Verwendung von Block-Modellen in großen und inhomogenen Einzugsgebieten zu erheblichen Fehlern führen. Deshalb ist für die meisten Block-Modelle eine Obergrenze der Einzugsgebietsfläche angegeben, ab der die Modelle nicht mehr verwendet werden sollten.

Räumlich verteilte = Distributive Modelle: Diese große Gruppe von Modellen, bei denen sowohl Eingangsgrößen als auch Berechnungsergebnisse räumlich differenziert betrachtet werden, lässt sich noch weiter untergliedern:

Teileinzugsgebietsmodelle: Das gesamte Einzugsgebiet wird in mehrere kleine Teileinzugsgebiete, die s.g. Hydrologischen Reaktions-Einheiten (Hydrological Response Units = HRUs), unterteilt, die durch eine Baumstruktur (Gewässernetz) miteinander in Verbindung

stehen. Diese HRUs sind aggregierte Modelleinheiten (Block-Modelle) mit homogener hydrologischer Dynamik. Hydrotope (als Analogie zu Biotopen) sind HRUs mit ähnlicher Landnutzung sowie gleichartigen topographischen, pedologischen und meteorologischen Verhältnissen unter hydraulischen Gesichtspunkten.

Höhenlinienbasierte Modelle: Als Bezugseinheiten dienen Höhenlinien, Tiefenlinien und Geländebruchkanten aus topographischen Kartenwerken. Dieser Ansatz ist zwar prinzipbedingt etwas ungenauer aufgrund der Generalisierung von Höhenlinien in den Ausgangsmedien, er stellt jedoch eine kostengünstige Alternative zur Verwendung von DHMs dar, zumal viele großmaßstäbige DHMs ebenfalls nur aus topographischen Karten abgeleitet sind. Alternativ ist es mit GIS möglich die Höhenlinien aus einem DHM zu entwickeln.

Rasterbasierte Modelle: Zur räumlichen Gliederung dient ein gleichmäßiges quadratisches Raster mit einer Auflösung, welche die Abbildung abflussrelevanter Parameter mit ausreichender Genauigkeit erlaubt. Da diese Methode relativ einfach am Computer und mittels GIS umzusetzen ist, sind diese Modelle sehr zahlreich und weit verbreitet. Vereinfachend wirkt sich unter anderem die Tatsache aus, dass Rasterstrukturen von Haus aus eine feste topologische Beziehung aufweisen; diese Beziehung der Elementarflächen zueinander muss also nicht aufwändig nachmodelliert werden. Ein weiterer Vorteil liegt in der Möglichkeit Fernerkundungsdaten wie Radarscans oder Luftbilder mit geringerem Aufbereitungsaufwand einsetzen zu können. Aus Infrarotbildern kann z.B. der hydrologische Faktor "Vegetation" abgeleitet werden. Rein raster- oder gar voxel-basierende Ansätze eignen sich derzeit noch nicht für sehr große Einzugsgebiete. Bei zu großer Auflösung (z.B. $< 1 \text{ m}^2$), ist das Modell mit aktueller Rechentechnik nicht mehr auswertbar; steigt die Zellgröße gehen abflussrelevante Details, wie Gräben und kleine Retentionsräume verloren ([14] LAHMER, 2000, S.95ff).

TIN- und polygonbasierende Modelle: Dabei dient ein irreguläres Dreiecksnetz zur Darstellung der Topographie und Polygonflächen zur Wiedergabe der räumlicher Gliederung. Der Vorteil besteht in einer guten Skalierbarkeit. Die Rechnerbelastung wird durch die Detailliertheit wichtiger Parameter festgelegt und nicht durch ein fest vorgegebenes Raster. Allerdings werden dadurch die Berechnungsalgorithmen aufwändiger.

Erst durch die räumliche Gliederung wird es möglich, elementare Komponenten wie Teileinzugsgebiete, Rohrleitungen bzw. Gewässerläufe und Retentionsräume wie Seen oder Rückhaltebecken sinnvoll abzubilden. Geographische Informationssysteme können insbesondere

im Bereich der räumlichen Analysen einen wertvollen Beitrag zur Verbesserung hydrologischer Modelle leisten ([9] FÜRST, 2004, S.146).

6.2.1.3 Die Dimension Zeit

Hydrologische Systeme können zu verschiedenen Zeitpunkten unterschiedliche Zustände einnehmen, sonst wären Extremereignisse wie z.B. Hochwasser nicht möglich. Die Einbeziehung der Dimension Zeit in das Systemverhalten von Abflussmodellen erfolgt unterschiedlich:

Stationär, zeitunabhängig, probabilistisch: Es wird davon ausgegangen, dass die Abflussereignisse rein zufällig sind und nicht voneinander abhängen. Nur der Scheitelabfluss der Hochwasserwelle soll bestimmt werden, eine Interaktion mit zeitlich versetzten Hochwasserwellen aus Nebeneinzugsgebieten wird nicht untersucht.

Ereignisbezogen, instationär: Niederschläge mit unterschiedlicher Dauer und Intensität führen zu unterschiedlich hohen Abflüssen. Die Gruppe der Niederschlags-Abfluss-Modelle beruht auf diesem kausalen Zusammenhang (Abflussbildung, Abflusskonzentration, Speicherung, Verluste). Der Ausgangszustand des Systems spielt hier ebenfalls eine eher untergeordnete Rolle und wird meist vom Benutzer vorgegeben. Betrachtet man den Anstieg und das spätere Absinken des aus dem Regenereignis resultierenden Abflusses an der Stelle XY, so herrschen instationäre Verhältnisse vor. Daraus ergeben sich für die Gerinnehydraulik interessante Effekte, da sich durch instationäre Vorgänge das abflusswirksame Gewässergefälle bei gleichbleibendem Sohlgefälle ändert ([20] MANIAK, 1997, S.342f).

Kontinuierlich, wasserhaushaltsbezogen: Bei Frühjahrsniederschlägen, die zu Schneeschmelzen führen, ist der Abfluss im besonderen Maße vom Ausgangszustand (hier der Schneelage und gefrorener Boden) abhängig. Deshalb werden von vielen neueren Modellen Langzeitmessungen von Temperatur, Niederschlag, Sonneneinstrahlung und Kontrollpegel zur Abflussbestimmung herangezogen. Es wird dabei der gesamte ober- und unterirdische Wasserhaushalt des Gebietes durch gekoppelte Niederschlags-Abfluss-, Grundwasser-, Wellenablauf- und Zeitreihenmodelle nachempfunden. Durch Simulation von unterschiedlichen Niederschlägen zu verschiedenen Zeitpunkten wird versucht, die Genauigkeit der Aussagen zu erhöhen und die Schwankungsbreite dieser Aussagen zu ermitteln.

Je mehr Einflussfaktoren modelliert werden, desto universeller und theoretisch genauer kann das Modell an die tatsächlichen Verhältnisse angepasst werden. Dabei steigen jedoch Anfor-

derungen und Kosten überproportional, so dass diese Modelle für die meisten Fragestellungen derzeit noch zu unwirtschaftlich sind. Des Weiteren ist zu beachten, dass der Gesamtfehler als eine Funktion der Einzelfehler zu verstehen ist. Modelle mit hohem Detaillierungsgrad weisen eine große Anzahl von Einzelfehlern auf. Die Art und Weise wie die Einzelparameter in die Berechnung einfließen, bestimmt den Gesamtfehler.

6.2.2 Klassifikation nach Art der Implementierung

Abflussmodelle werden in der hydrologischen Literatur oft nach der Art Ihrer Funktionsweise gegliedert ([16] LECHER, 2001, S.322ff). Zur besseren Orientierung wird diese alternative Gliederung ebenfalls kurz vorgestellt.

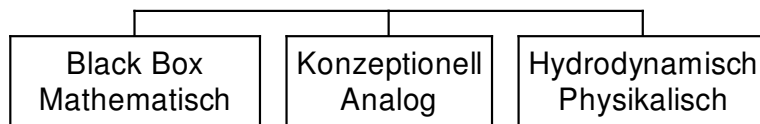


Abbildung 21: Gliederung von Abflussmodellen aufgrund des kausalen Zusammenhangs

Mathematisch, empirisch: Aufgrund von Naturbeobachtungen und Experimenten wird ein komplexes System abstrakt mit mathematischen Gleichungen beschrieben, die alle ablaufenden Teilprozesse und ihre Verknüpfungen untereinander beschreiben. Diese Black Box Modelle bestehen oft aus Gleichungen, die das Ergebnis von Regressionsrechnungen sind.

Analog, konzeptionell: Sind die ablaufenden physikalischen Prozesse bei der Abflussbildung noch unzureichend physikalisch untersucht, wird bei der Modellierung auf ähnliche physikalische Vorgänge von anderen Naturprozessen wie z.B. den Stromfluss zurückgegriffen. Das Analogiemodell ist somit als eine Zwischenstufe zwischen physikalischem und mathematischem Modell anzusehen.

Physikalisch, hydrodynamisch: Es wird versucht möglichst viele, in der Natur ablaufende Teilprozesse in Bezug auf Struktur, Dynamik und Funktion, mit Gesetzen der Physik beschreiben. Dabei muss beachtet werden, dass viele bewährte Komponenten, wie z.B. Rauigkeitsbeiwerte nach Strickler, ebenfalls empirischen Ursprungs sind. Die physikalische Ausgangsbasis macht die Modelle unabhängig und übertragbar, jedoch müssen sie an das entsprechende Gewässer angepasst werden. Kalibrierungsmöglichkeiten, meist jedoch im Trial-and-Error-Verfahren, sind in nahezu allen Programmpaketen vorhanden ([2] BMU, 1997, S.47).

6.3 Die Rolle von GIS bei der Abflussmodellierung

Die Fähigkeiten von GIS in der Verwaltung und Aufbereitung von Eingangsdaten und in der Analyse und Darstellung der Ergebnisse wurde schon frühzeitig für die hydrologische Modellierung entdeckt ([9] FÜRST, 2004, S.150). Die Einbeziehung in den Modellierungsvorgang kann dabei auf mehreren Ebenen stattfinden. Sie reicht von der reinen Ermittlung hydrologischer Parameter über hydrologische Abschätzungen bis zur Koppelung oder Integration von Gis und hydrologischen Modell. Dabei kann man verschiedene Arten der Koppelung unterscheiden:

Bei der losen Koppelung sind beide Programmteile unabhängig voneinander funktionsfähig. Der Datenaustausch findet über den Benutzer statt. Weiterhin gibt es die Möglichkeit GIS-Software (z.B. über Programmmodule) in hydrologischer Modellsoftware zu integrieren oder im umgekehrten Fall hydrologische Modelle unter der GIS-Benutzeroberfläche zu verwenden. Eine vierte Form der Kopplung ist die Integration von GIS und hydrologischem Modell in einer eigenständigen Benutzerumgebung.

6.3.1 Probleme bei der Einbeziehung von GIS in die Abflussmodellierung

Aufgrund von konzeptionellen Unterschieden bei der Implementierung von Raum, Zeit und Zufall in der Abflussmodellierung einerseits und im Nichtvorhandensein in derzeitigen GIS auf der anderen Seite, entstehen Probleme bei der Kopplung. So sind wichtige hydrologische Phänomene wie zeitlich-kontinuierlich schwankende Abflüsse oder Bodenfeuchte mit konventionellen GIS kaum abbildbar. Weiterhin wirkt sich die eingeschränkte Objektorientiertheit von Attributwerten negativ auf eine kausale, physikalisch basierte Modellierung aus. Konzepte von Fuzzy-Logic und Stochastik fehlen ebenfalls weitgehend.

Auf der anderen Seite basieren viele Modelle auf einer subjektiven Auswertung von Gebiets-eigenschaften, die unter Nutzung von GIS nachvollziehbarer gewesen wären. Somit kommen unterschiedliche Anwender der Modelle zu unterschiedlichen Ergebnissen. Es stellt sich also nicht nur die Frage, ob man Gis für die Ermittlung von Ausgangsparametern einsetzen kann, sondern auch, ob man damit zu den gleichen Ergebnissen kommt wie der Modellentwickler.

6.3.2 Das ArcGIS Hydro data model

Aufgrund der im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Probleme gibt es Vorstöße zur nahtlosen Integration von GIS in die hydrologischen Berechnungsverfahren. Das ArcGIS™ Hydro data model, weiterhin ArcHydro genannt, ist eine Kooperation von ESRI®, Prof. Dr. Maidment, Texas und zahlreichen Vertretern aus Politik, Wissenschaft und Wirtschaft ([19] MAIDMENT, 2002, S.VIII). ArcHydro ist eine Datenstruktur in ArcGIS™, die es ermöglicht, hydrologische Modelle und Steuerungssoftware für wasserbauliche Anlagen besser mit ArcGIS zu koppeln, indem wasserbauliche Begrifflichkeiten und Beziehungen direkt in ein spezielles Objektmodell implementiert wurden ([19] MAIDMENT, 2002, S.7f).

So ist es beispielsweise möglich, hydrologische Daten wie Pegelaufzeichnungen direkt im GIS darzustellen, was insbesondere durch die Einbeziehung von Zeitserien ermöglicht wurde. Weiterhin stellt das Objektmodell Funktionen zur Verfügung, verschiedene Themen inhaltlich miteinander zu verknüpfen, um somit z.B. einen Sinnzusammenhang von einer Pegelmessstelle zu einem Gewässer herzustellen. Somit könnte sich ArcHydro zu einem Bindeglied zwischen ArcGIS™ und hydrologischer Modellierungssoftware entwickeln.

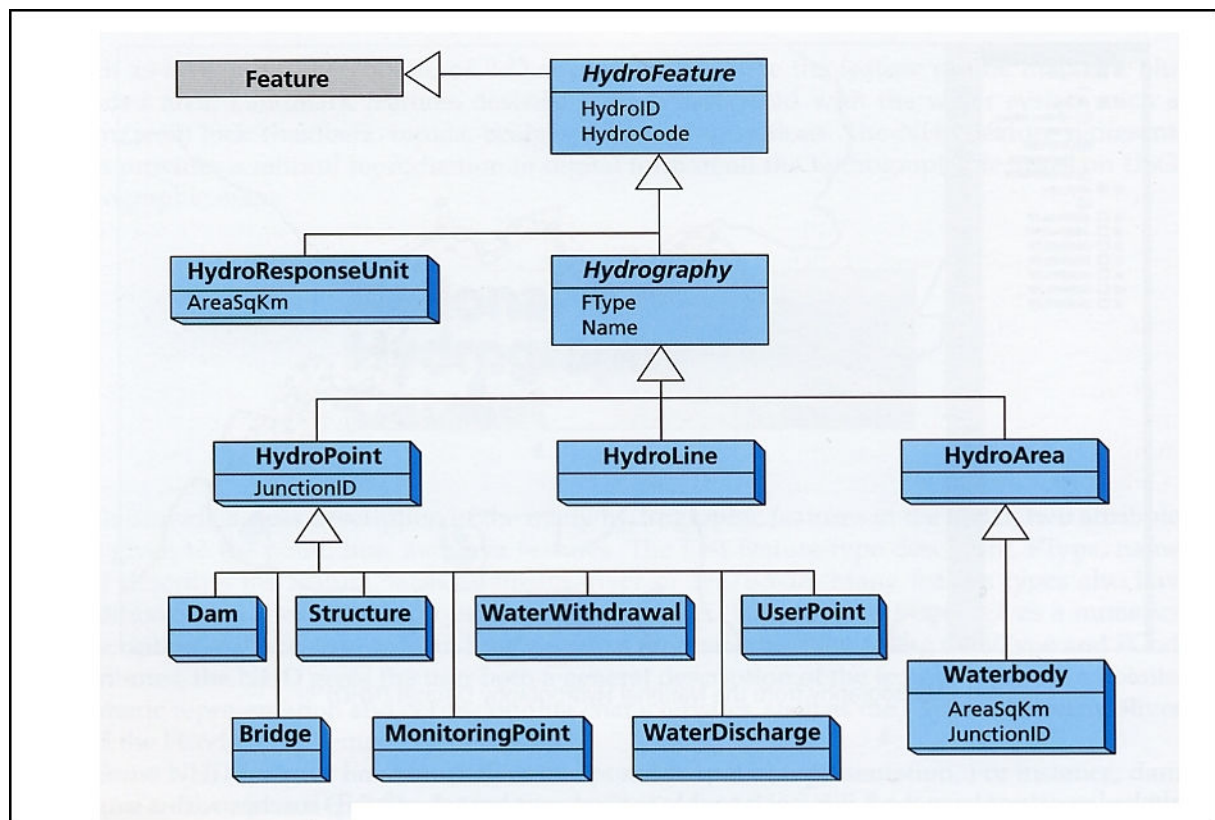


Abbildung 22: Beziehungen hydrologischer Objektklassen im ArcGIS™ Hydro data model. Aus ([19] MAIDMENT, 2002, S. 122).

6.4 Kriterien der Modellauswahl

Die Taxonomie der Abflussmodelle vermittelt den Eindruck einer zeitlich kontinuierlichen Entwicklung in der Abflussmodellierung. Man könnte davon ausgehen, dass in der heutigen Praxis nur noch stochastische, räumlich- und zeitlich korrelierte Wasserhaushaltsmodelle Verwendung finden. Dem ist jedoch nicht so, im Gegenteil werden für viele Planungen Nachweise durch deterministische, mathematische, räumlich aggregierte Modelle gefordert. Dies wird zum einen mit der damit verbundenen jahrelangen Erfahrung und zum anderen mit der angeblich ausreichenden Genauigkeit dieser Verfahren begründet. Bei der Auswahl sollen deshalb gezielt diese "gebräuchlichen" Modelle herangezogen werden um einen ersten Überblick über den qualitätssteigernden Einfluss durch die Verwendung von Gis zu erhalten.

Da die Anzahl der allein in Deutschland üblichen Modelle und ihrer Derivate ([2] BMU, 1997, S.7f) den Rahmen der Arbeit sprengen würde, fanden weitere Eingrenzungen statt. Die Wahl fiel dabei auf ein Modell, das auf dem Gebiet der ehemaligen DDR sehr verbreitet ist und ein Modell, das sowohl in Deutschland als auch in Österreich häufig Verwendung findet.

6.5 Deterministische, räumlich aggregierte Modelle

Viele dieser Modelle stammen aus einer Zeit, in der hydrologische Berechnungen noch ohne Computereinsatz durchgeführt wurden. Die Tatsache, dass diese Modelle auch heute noch Verwendung finden, wirft die Frage auf, ob bereits sehr einfache Modelle eine ausreichende Genauigkeit liefern können. Dies kann im Rahmen dieser Arbeit, wenn überhaupt, nur im Versagensfall beantwortet werden, da bei nur einem betrachteten und zudem kleinen Einzugsgebiet ein "korrektes" Ergebnis ebenso ein "Zufallstreffer" sein kann (siehe dazu auch Kapitel 6.7: Vergleichende Gegenüberstellung, S.66 ff).

6.5.1 Lauterbach – Glos

Das Lauterbach-Glos-Verfahren ist eine Methode zur Berechnung eines Hochwassers mit beliebiger Wahrscheinlichkeit auf dem Gebiet der ehemaligen DDR. Es wurde auf Grundlage von Pegelauswertung nach dem Whisler-Smith-Verfahren von 179 Pegeln entwickelt. Dabei wurde das Regionalisierungsproblem über zwei Isolinienkarten (siehe unten) gelöst, aus der die Ortsfaktoren α bzw. β zu entnehmen sind ([15] LAUTERBACH, 1965, S.11f). Der Abfluss mit einer bestimmten Jährlichkeit berechnet sich nach folgender Formel:

$$HQ_X = hQ_{0,5} \cdot (C_{V \log})^u \left[\frac{m^3}{s} \right] \quad \text{mit :}$$

$$hQ_{0,5} = \frac{10^\alpha \cdot I_{FN}^{0,2} \cdot F_N^{0,86}}{\left(\frac{L}{F_N} \right)^{0,1} \cdot 10^{\Delta C_3} \cdot 10^3} \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

$$C_{V \log} = \beta - 5,9\alpha - 0,22 \log F_N$$

HQ_X Ergebnis des Hochwasserabflusses in m^3 pro Sekunde

α / β Orts- bzw. Regionalisierungsfaktoren, die aus Karten ermittelt werden (siehe unten)

I_{FN} Mittleres Geländegefälle des Einzugsgebiets. In der Originaldokumentation wird folgende Vorgehensweise vorgeschlagen: Bei großen Flächen nimmt man die Kreuzungspunkte der Gitternetzlinien, die in jeder 1:25.000er Karte eingezeichnet sind, bestimmt dann das im Schnittpunkt vorliegende Gefälle anhand von Höhenlinien und mittel die Einzelgefälle wie Stichproben. Bei kleineren Flächen muss man selbst ein Raster über die Karte legen und genauso verfahren. Die Anzahl der Stichproben sollte etwa der Einzugsgebietsgröße in km^2 entsprechen (also $A_E = 37,2 km^2$ bedeutet 38 Gefälle-Stichproben).

F_N Einzugsgebiet (= A_E) [km^2]

L Gesamte Länge des Fluss-/Bachlaufes [km]

ΔC_3 Korrekturfaktor für Retentionsflächen F_R (Seen, Talsperren, Flächen ohne Abfluss)

$$\frac{F_R}{F_N} \leq 0,1 \Rightarrow \Delta C_3 = 0$$

$$\frac{F_R}{F_N} > 0,1 \Rightarrow \Delta C_3 = 0,31 \cdot \frac{F_R}{F_N} - 0,031$$

u Mit u kann man die Jährlichkeit festlegen. Man liest u aus nachfolgender Tabelle ab:

Wiederkehrintervall n [Jahre]	u
2	1,732
5	2,128
10	2,394
20	2,638
25	2,713
50	2,935
100	3,144
200	3,341

Tabelle 7: Variablen zur Bestimmung der Jährlichkeit nach dem Modell nach Lauterbach-Glos ([15] LAUTERBACH, 1965, S.33).

Lauterbach und Glos weisen darauf hin, dass das Modell für Einzugsgebiete kleiner 20 km² nicht verwendet werden sollte und geben für Ihr Verfahren folgende durchschnittlichen Fehlerabweichungen an ([15] LAUTERBACH, 1965, S.34):

$$HQ_{0,5} \quad \pm 10 \%$$

$$HQ_{10} \quad \pm 16 \%$$

$$HQ_{100} \quad \pm 20 \%$$

Diese Abweichungen beziehen sich auf die jeweiligen statistischen Pegelauswertungen von 1963/64 und dürfen nicht überbewertet werden. Es zeigt sich jedoch (wie bei vielen Modellen), dass die Ergebnisse mit zunehmender Jährlichkeit unsicherer werden.

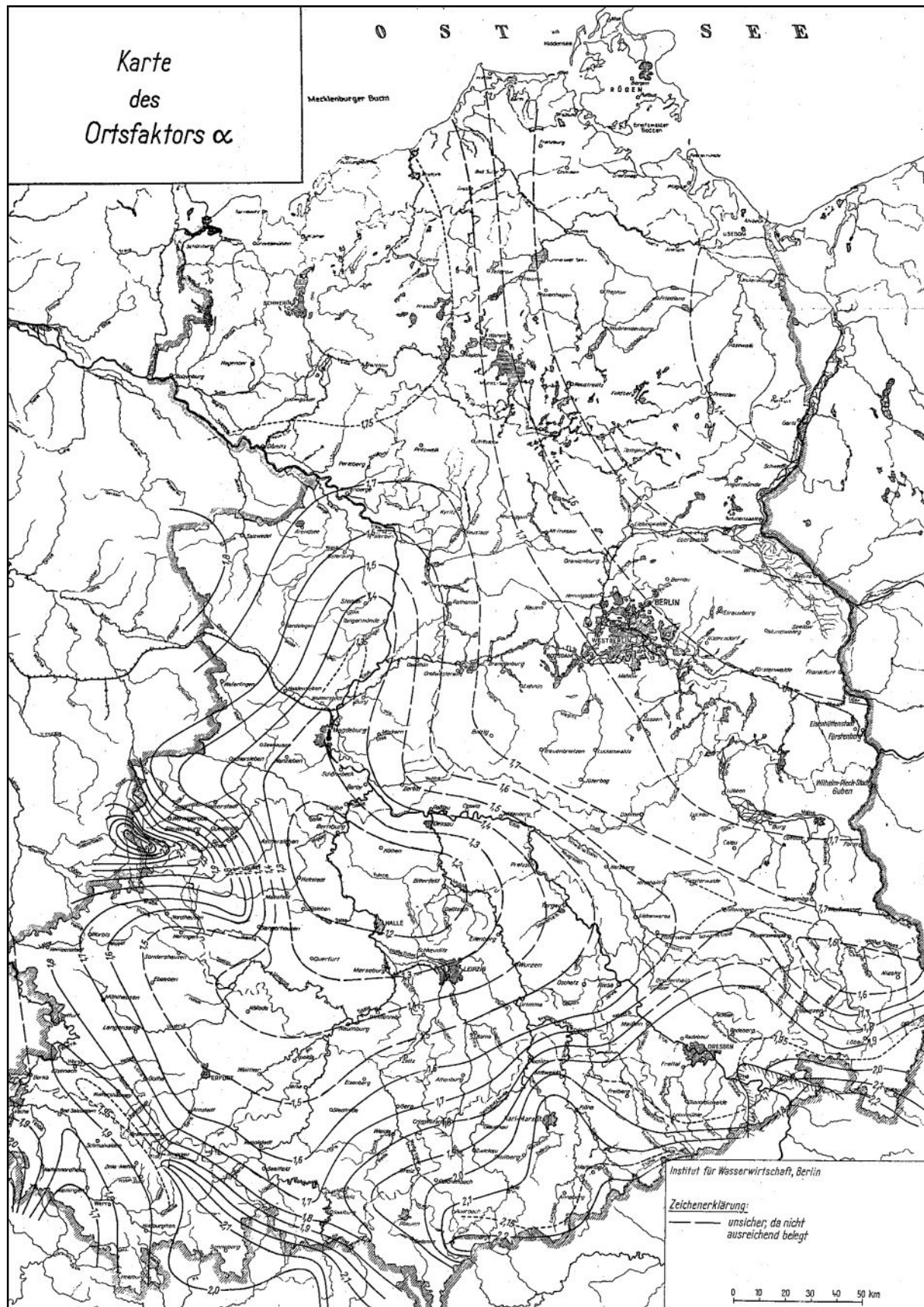


Abbildung 23: Ortsfaktoren " α " nach Lauterbach/Glos aus ([15] LAUTERBACH, 1965).

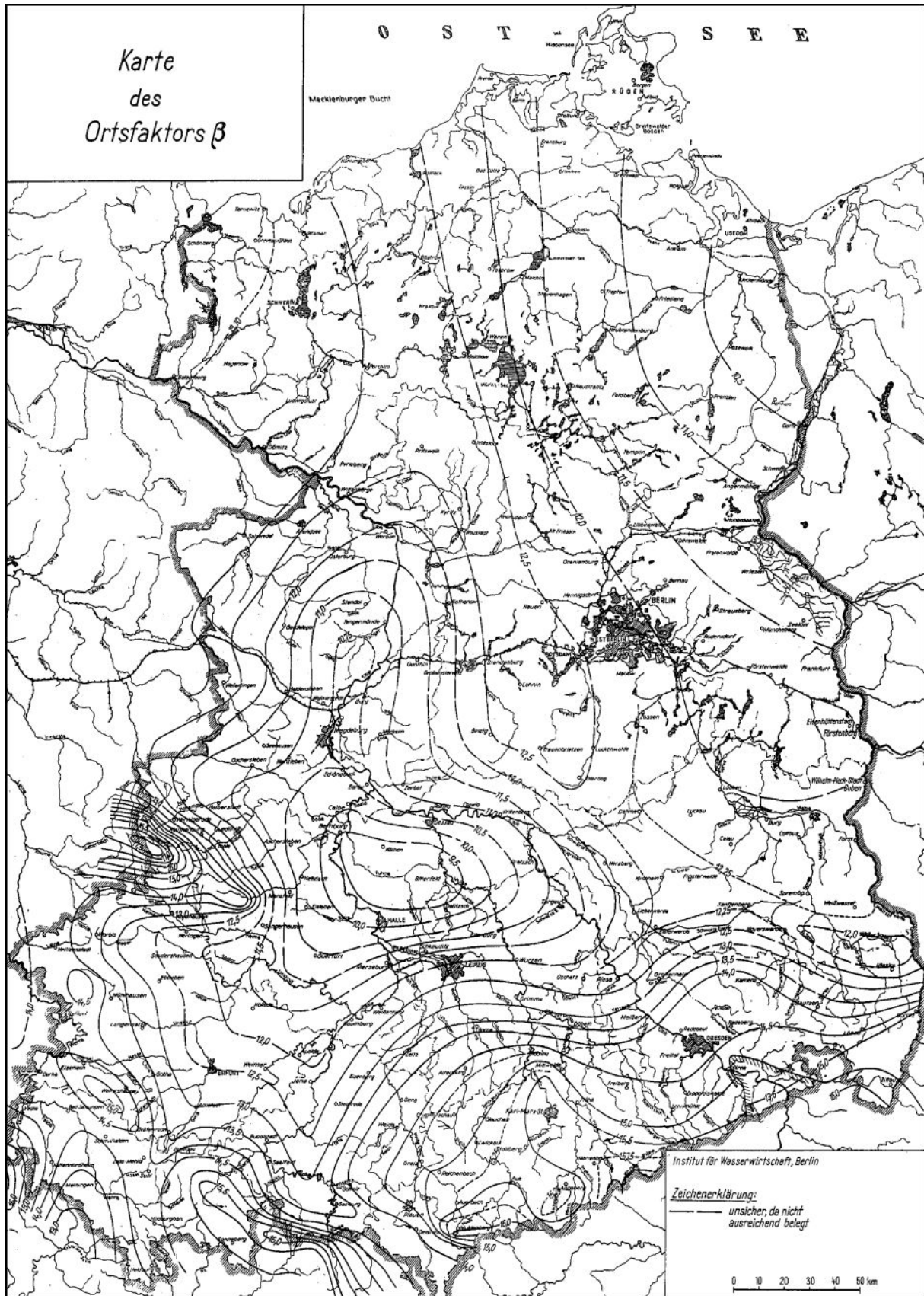


Abbildung 24: Ortsfaktoren " β " nach Lauterbach/Glos aus ([15] LAUTERBACH, 1965).

In der Regel werden die Ortsfaktoren α und β abgeschätzt, was in diesem Fall die Werte $\alpha = 2.1$ und $\beta = 15.5$ ergeben würde.

Die Ermittlung der Ortsfaktoren kann jedoch auch mit GIS erfolgen, was mit zunehmender Einzugsgebietsgröße immer sinnvoller erscheint. Dazu müssen die Isolinien in eine kontinuierliche Ortsfaktorenfläche umgerechnet werden. Als erster Ansatz kann dies über ein Dreiecksnetz erfolgen, das aus den Isolinien als harte Bruchkanten entstanden ist. Nach der Georeferenzierung der Ortsfaktorkarten werden die Isolinien abdigitalisiert und mit den entsprechenden α - und β -Werten attributisiert. Anschließend wird daraus ein Dreiecksmodell mit den Attributen als Höhenangaben erzeugt. Dies führt zu einer linearen Werteverteilung zwischen den Isolinien. Denkbar wäre auch eine Auswertung durch eine kontinuierliche Splinefläche. Dies hätte zur Folge, dass auch Werte entstehen, die größer als der höchste Wert der beschrifteten Isolinien sind. Ob dies zulässig ist, kann nur durch eine fachliche Auseinandersetzung mit der Thematik geklärt werden.

Das Dreiecksmodell wird anschließend in ein Grid konvertiert, auf die Größe des Einzugsgebietes zugeschnitten und statistisch ausgewertet.

Dabei erhält man folgende Ortsfaktorwerte:

```
Alfa-Wert:  
Mittelwert: 2.09548  
Maximum: 2.04061  
Minimum: 2.10000  
(Standard-Abweichung: 0.01028)
```

```
Beta-Wert:  
Mittelwert: 15.48326  
Maximum: 15.37792  
Minimum: 15.50000  
(Standard-Abweichung: 0.02923)
```

Die Berechnung der Abflüsse erfolgt in einem während der Arbeit entstanden VBA-Programm, das MS-Access™ als Laufzeitumgebung und Datenspeicher nutzt. Dort sind die oben beschriebenen Formeln als Funktionsmodule eingegeben und werden von den Formularen aufgerufen. Tabellen dienen zur Speicherung der Ausgangsdaten.

Abflussberechnung nach Lauterbach und Glos

Gewässerpunkt:

Eingabe der Daten:

Einzugsgebietsfläche FN	<input type="text" value="37.9650"/>	[km ²]
Retentionsfläche FR	<input type="text" value="0.0000"/>	[km ²]
Länge des Hauptvorfluters L	<input type="text" value="11.1500"/>	[km]
Absolutes Gefälle IFN	<input type="text" value="0.2156"/>	[-]
alfa-Beiwert aus Karte	<input type="text" value="2.1000"/>	[-]
beta-Beiwert aus Karte	<input type="text" value="15.5000"/>	[-]

$$\frac{F_R}{F_N} \leq 0,1 \Rightarrow \Delta C_3 = 0$$

$$\frac{F_R}{F_N} > 0,1 \Rightarrow \Delta C_3 = 0,31 \cdot \frac{F_R}{F_N} - 0,031$$

Ergebnisse:

Cvlog: [-]

$$C_{vlog} = \beta - 5,9\alpha - 0,22 \log F_N$$

hQ0,5: [m³/s]

$$hQ_{0,5} = \frac{10^\alpha \cdot I_{Fv}^{0,2} \cdot F_N^{0,86}}{\left(\frac{L}{F_N}\right)^{0,1} \cdot 10^{4C_3} \cdot 10^3}$$

Abfluss: $HQ_x = hQ_{0,5} \cdot (C_{vlog})^x$

2-jährlich, u = 1,732	<input type="text" value="10,91"/>	[m ³ /s]
5-jährlich, u = 2,128	<input type="text" value="16,31"/>	[m ³ /s]
10-jährlich, u = 2,394	<input type="text" value="21,37"/>	[m ³ /s]
20-jährlich, u = 2,638	<input type="text" value="27,39"/>	[m ³ /s]
25-jährlich, u = 2,713	<input type="text" value="29,56"/>	[m ³ /s]
50-jährlich, u = 2,935	<input type="text" value="37,04"/>	[m ³ /s]
100-jährlich, u = 3,144	<input type="text" value="45,80"/>	[m ³ /s]
200-jährlich, u = 3,341	<input type="text" value="55,95"/>	[m ³ /s]

Abbildung 25: Berechnung der Scheitelabflüsse nach Lauterbach u. Glos. Die Ausgangsparameter wurden durch Auswertung der Topographischen Karte im Maßstab 1:50.000 ermittelt.

Abflussberechnung nach Lauterbach und Glos

Gewässerpunkt:

Eingabe der Daten:

Einzugsgebietsfläche FN	<input type="text" value="37.7960"/>	[km ²]
Retentionsfläche FR	<input type="text" value="0.0000"/>	[km ²]
Länge des Hauptvorfluters L	<input type="text" value="12.1050"/>	[km]
Absolutes Gefälle IFN	<input type="text" value="0.2439"/>	[-]
alfa-Beiwert aus Karte	<input type="text" value="2.0955"/>	[-]
beta-Beiwert aus Karte	<input type="text" value="15.4833"/>	[-]

$$\frac{F_R}{F_N} \leq 0,1 \Rightarrow \Delta C_3 = 0$$

$$\frac{F_R}{F_N} > 0,1 \Rightarrow \Delta C_3 = 0,31 \cdot \frac{F_R}{F_N} - 0,031$$

Ergebnisse:

Cvlog: [-]

$$C_{vlog} = \beta - 5,9\alpha - 0,22 \log F_N$$

hQ0,5: [m³/s]

$$hQ_{0,5} = \frac{10^\alpha \cdot I_{Fv}^{0,2} \cdot F_N^{0,86}}{\left(\frac{L}{F_N}\right)^{0,1} \cdot 10^{4C_3} \cdot 10^3}$$

Abfluss: $HQ_x = hQ_{0,5} \cdot (C_{vlog})^x$

2-jährlich, u = 1,732	<input type="text" value="10,91"/>	[m ³ /s]
5-jährlich, u = 2,128	<input type="text" value="16,34"/>	[m ³ /s]
10-jährlich, u = 2,394	<input type="text" value="21,43"/>	[m ³ /s]
20-jährlich, u = 2,638	<input type="text" value="27,49"/>	[m ³ /s]
25-jährlich, u = 2,713	<input type="text" value="29,67"/>	[m ³ /s]
50-jährlich, u = 2,935	<input type="text" value="37,21"/>	[m ³ /s]
100-jährlich, u = 3,144	<input type="text" value="46,05"/>	[m ³ /s]
200-jährlich, u = 3,341	<input type="text" value="56,30"/>	[m ³ /s]

Abbildung 26: Berechnung der Scheitelabflüsse nach Lauterbach/Glos. Die Ausgangsparameter wurden durch Auswertung eines digitalen Höhenmodells ermittelt.

6.5.2 Das Lutz-Verfahren

Nach umfangreichen Niederschlags-Abfluss-Auswertungen (75 Einzugsgebiete und fast 1000 Niederschlagsereignisse) entwickelte Lutz Kurven für einen normierten HW-Scheitelabfluss Q_S^* für Deutschland. Mit Hilfe dieser Normabflüsse, die für einen Effektivniederschlag von 10 mm und eine Einzugsgebietsgröße von 10 km² ermittelt wurden, lassen sich Scheitelabflüsse in Abhängigkeit ihrer Wahrscheinlichkeit für Einzugsgebiete bis ca. 200 km² berechnen ([17] LUTZ, 1984).

$$HQ_X = Q_S^* \cdot \frac{A_E \cdot N_{\text{eff}}}{100} + Mq \cdot A_E \quad \text{mit}$$

$$N_{\text{eff}} = N_{\text{eff},s} + N_{\text{eff},u}$$

$$N_{\text{eff},s} = (N - A'_V) \cdot \varphi_s \cdot \frac{A_S}{A_E}$$

$$N_{\text{eff},u} = \left[(N - A_V) \cdot c + \frac{c}{a} \cdot (e^{-a \cdot (N - A_V)} - 1) \right] \cdot \frac{A_E - A_S}{A_E} \quad \text{mit}$$

$$a = C1 \cdot e^{-C2/WZ} \cdot e^{-C3/qB}$$

HQ_X	Hochwasser in Abhängigkeit seiner Wahrscheinlichkeit [m ³ /s]
Q_S^*	Normabfluss aus Diagramm (siehe unten) [m ³ /s]
A_E	Einzugsgebietsfläche [km ²]
A_S	Versiegelte Fläche, meist 30 % bis 50 % der bebauten Fläche [km ²]
Mq	mittlere Abflusspende, zur Ermittlung des Basisabflusses [m ³ /(s · km ²)]. Der Wert ist aus der Hochwasserstatistik zu erhalten
N	Gebietsniederschlag in Abhängigkeit von der Regendauer aus [7] DWD [mm]
A'_V	Anfangsverlust für versiegelte Flächen (meist nur ca. 1 mm) [mm]
A_V	Anfangsverlust für unversiegelte Flächen [mm]
φ_s	Abflussbeiwert für den versiegelten Anteil (liegt meist etwas unter 1)
c	maximaler Abflussbeiwert für unversiegelte Flächen in Abhängigkeit von Landnutzung und Bodentyp (siehe Tabelle)

- C1 = 0,02 für den Anfang, dient später zur Kalibrierung
- C2 = 2,0 für Weideland und Nadelwald, Laubwald und intensiv genutzte Flächen = 4,62
- C3 = 2,0
- WZ Wochenzahl zur Beschreibung der Jahreszeit. Im Sommer trägt man 5 ein, im Frühjahr und Herbst 15 und 23 im Winter.
- q_B Basisabflussspende hier in [ltr / (s · km²)] aus Hochwasserstatistik

Landnutzung	Anfangsverluste A _v [mm]			
	Bodentyp A	Bodentyp B	Bodentyp C	Bodentyp D
Landwirtschaftliche Flächen: A _{v1}	7.0	4.0	2.0	1.5
Bewaldete Flächen: A _{v2}	8.0	5.0	3.0	2.5
Versiegelte Flächen		A' _v = 1.0 mm		
Bodentyp: A: Schotter, Kies, Sand (kleinster Abfluß) B: Feinsand, Löß, leicht tonige Sande C: Bindige Böden mit Sand, Mischböden: lehmiger Mehlsand, sandiger Lehm, tonig-lehmiger Sand D: Ton, Lehm, dichter Fels, stauender Untergrund (größter Abfluß)				

Abbildung 27: Bestimmung der Anfangsverluste A'_v und A_v. Aus [17] LUTZ, 1984, S. 79.

Zur Bestimmung der gebietsabhängigen Verlustbeiwerte können die vorher erstellten Boden- und Klimakarten herangezogen werden. Bei der Zusammenführung im GIS entsteht aus den beiden Einzelkarten eine Gesamtkarte, die sämtliche Informationen über Bodentyp und Landnutzung beinhaltet. Diesen Einzelflächen sind die entsprechenden Beiwerte aus den Tabellen zuzuordnen. Über einer Flächengewichtung lassen sich so mittlere Gebietswerte bestimmen. Dazu sind bei jeder Einzelfläche die Parameter mit der Flächengröße zu multiplizieren und aufzusummieren. Das Summenergebnis ist durch die Gesamtfläche zu teilen.

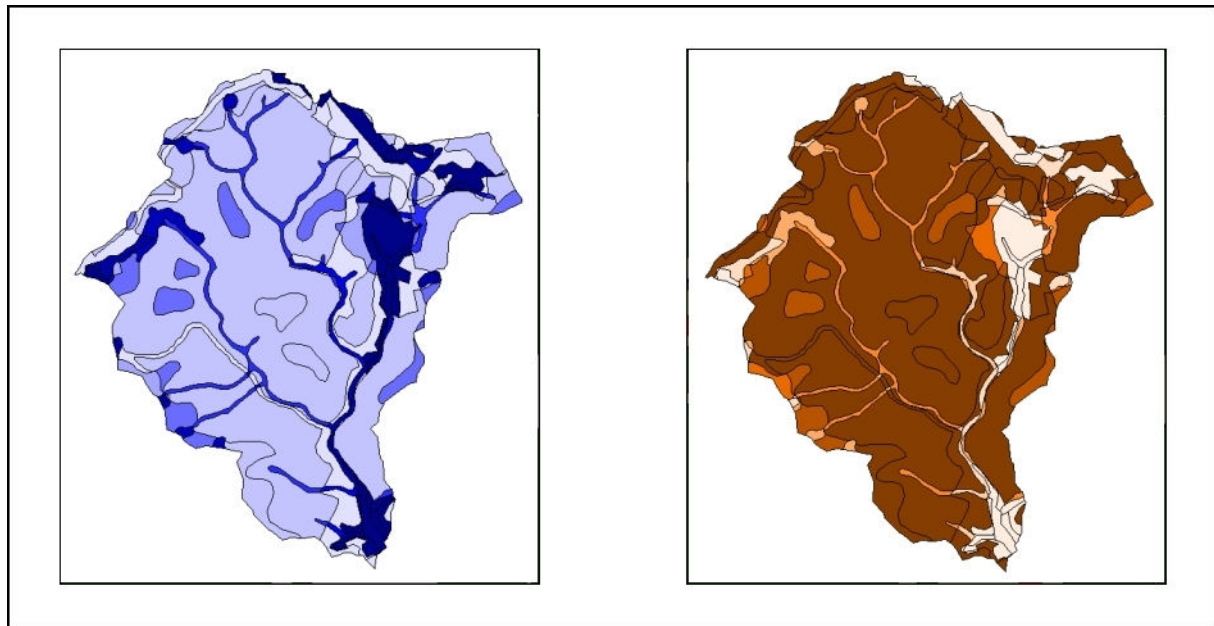


Abbildung 28: Ermittlung der Gebietsbeiwerte. Links Abflussbeiwerte (hellblau gering und dunkelblau hoch), rechts Anfangsverluste (weiß gering, dunkelbraun hoch).

i	Landnutzung	Maximale Abflußbeiwerte c [-]			
		Bodentyp			
		A	B	C	D
1	Waldgebiet	0.17	0.48	0.62	0.70
2	Ödland	0.71	0.83	0.89	0.93
3	Reihenkultur: Hackfrüchte Weinbau u.ä.	0.62	0.75	0.84	0.88
4	Getreideanbau, Weizen Roggen u. ä.	0.54	0.70	0.80	0.85
5	Leguminosen: Kleefeld, Luzerne Ackerfrüchte u.ä.	0.51	0.68	0.79	0.84
6	Weideland	0.34	0.60	0.74	0.80
7	Dauerwiese	0.10	0.46	0.63	0.72
8	Haine, Obstanlagen u. ä.	0.17	0.48	0.66	0.77

Bodentyp:
A: Schotter, Kies, Sand (kleinster Abfluß)
B: Feinsand, Löß, leicht tonige Sande
C: Bindige Böden mit Sand, Mischböden: lehmiger Mehlsand, sandiger Lehm, tonig-lehmiger Sand
D: Ton, Lehm, dichter Fels, stauender Untergrund (größter Abfluß)

Abbildung 29: Bestimmung des maximalen Abflussbeiwertes c. Aus [17] LUTZ, 1984, S. 80.

Zur endgültigen Berechnung muss nun noch Q_s^* ermittelt werden. Dazu ist die Anstiegszeit der Hochwasserwelle zu berechnen, um mit diesem Wert im Diagramm den normierten Scheitelabfluss Q_s^* ablesen zu können:

$$t_A = P1 \cdot \left(\frac{L \cdot L_C}{I_G^{1.5}} \right)^{0.26} \cdot e^{-0.016 \cdot U} \cdot e^{0.004 \cdot W}$$

- P1 Parameter, der abhängig ist von der Gebietsbebauung und der Vorfluterrauhigkeit [-]
 L Länge des Hauptgewässers von der Wasserscheide bis zum Kontrollpunkt [km]
 L_C Länge des Gewässers vom Einzugsgebietsschwerpunkt bis zum Kontrollpunkt [km]
 I_G Gewogenes Gefälle des Hauptgewässers [-]
 U Bebauter Flächenanteil [%]
 W Bewaldeter Flächenanteil [%]

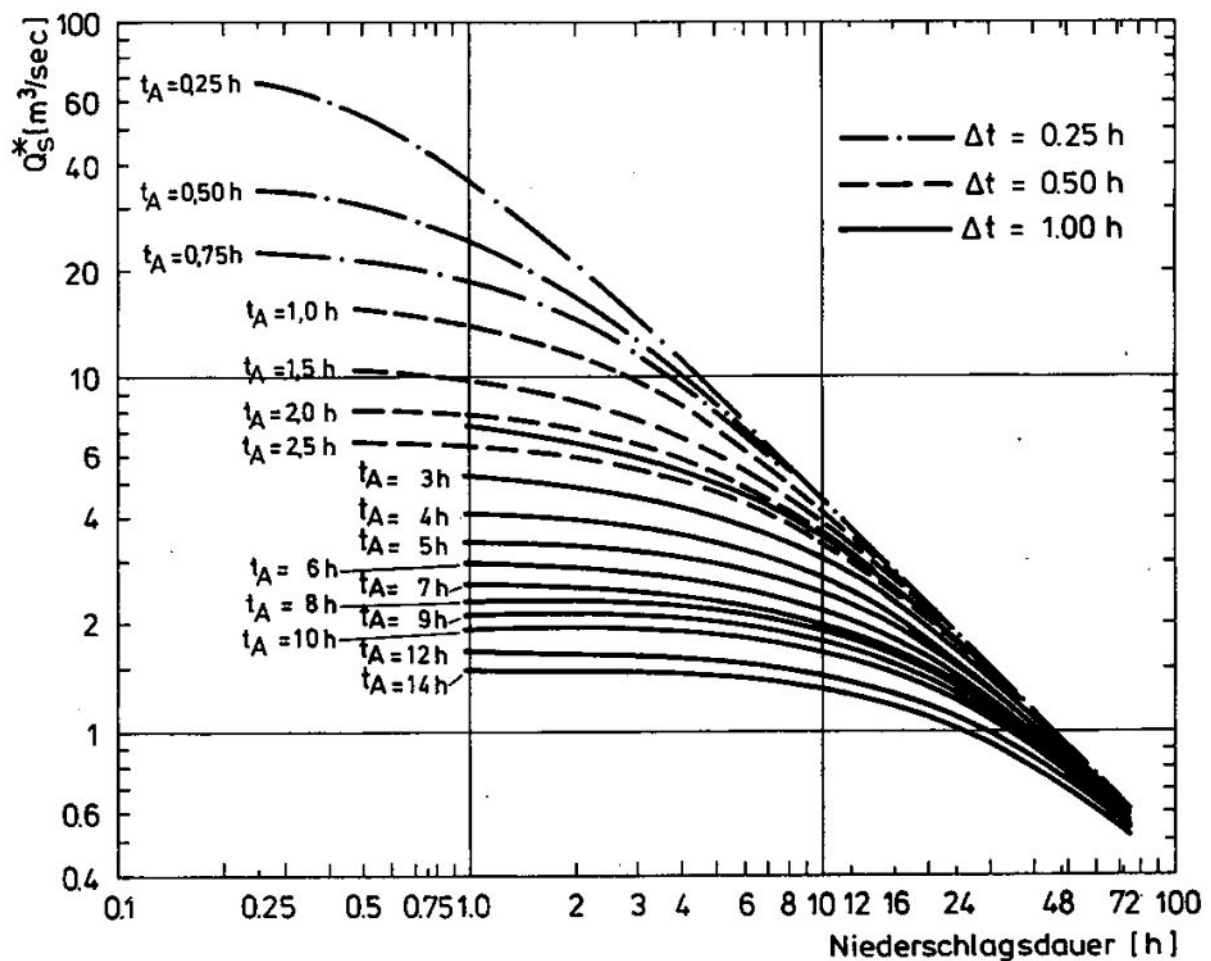


Abbildung 30: Diagramm zur Ermittlung des Normabflusses Q_s^* . Aus [17] LUTZ, 1984, S. 154.

L_C – die Fließlänge bis zum Gebietsschwerpunkt

Der Schwerpunkt von polygonalen Flächen lässt sich mit GIS leicht ermitteln und hat für das Referenzeinzugsgebiet die Koordinaten 4438821,5592685 (PD83). Von dort ist ein Lot auf den Hauptvorfluter zu fällen und die Fließstrecke bis zum Kontrollpunkt zu ermitteln. Dies erfolgt analog zur Fließlängenbestimmung, wobei beim Fließlängen-Grid der Zellwert von der Gesamtlänge anzuziehen ist. Dabei erhält man für die Digitalisierungsmethode die Länge 4,885 km und für die DHM-Methode den Wert 5,303 km.

Die Berechnung der Abflüsse erfolgt in einem während der Arbeit entstanden VBA-Programm, das MS-Access™ als Laufzeitumgebung und Datenspeicher nutzt. Dort sind die oben beschriebenen Formeln als Funktionsmodule eingegeben und werden von den Formularen aufgerufen. Tabellen dienen zur Speicherung der Ausgangsdaten.

Eingabe der Daten:		Ergebnisse:	
Gewässerpunkt	Pegel in Steinach, Top50	Ansteigszeit t_A :	2,754697 [h] R!
Q_s	5,8000 [m ³ /s]	$t_A = P1 \cdot \left(\frac{L \cdot L_c}{I_G^{1,5}} \right)^{0,26} \cdot e^{-0,016U} \cdot e^{0,004W}$	
Einzugsgebietsfläche A_E	37,9550 [km ²]	Neff. Siedlung:	2,856526 [mm] R!
Versiegelte Fläche A_S	1,8980 [km ²]	$N_{eff,s} = (N - A_v) \cdot \varphi_s \cdot \frac{A_S}{A_E}$	
M_q	0,0470 [m ³ /[skm ²]]	Neff. Landschaft:	6,292054 [mm] R!
Gesamtniederschlag N	57,7000 [mm]	$N_{eff,u} = \left[(N - A_v) \cdot c + \frac{c}{a} \cdot (e^{-a(N-A_v)} - 1) \right] \cdot \frac{A_E - A_S}{A_E}$ mit	
Gesamtniederschlagdauer	1,5000 [h]	$a = C1 \cdot e^{-C2/WZ} \cdot e^{-C3/qB}$	
Anfangsverlust versiegelte Fl. A_v'	1,0000 [mm]	Neff. Gesamt:	9,148580 [mm] R!
Anfangsverl. unversiegelte Fl. A_v	7,0000 [mm]	$N_{eff} = N_{eff,s} + N_{eff,u}$	
Abflussbeiwert für versiegelt F_i	0,9900 [-]	Abfluss:	21,923478 [m ³ /s] R!
Abflussbeiwert(Boden+Nutzung) c	0,4000 [-]	$HQ_x = Q_s \cdot \frac{A_E \cdot N_{eff}}{100} + M_q \cdot A_E$	
$C1$	0,0200 [-]		
$C2$	2,0000 [-]		
$C3$	2,0000 [-]		
WZ	15,0000 [-]		
Basisabflussspende q_B	47,4000 [ltr/[skm ²]]		
Gebietskonstante $P1$	0,2000 [-]		
Länge des Hauptvorfluters L	11,1500 [km]		
Länge bis Gebietsschwerpunkt L_c	4,8850 [km]		
Gewogenes Gefälle I_G	0,0260 [-]		
Anteil der bebauten Fläche U	10,0000 [%]		
Anteil der bewaldeten Fläche W	80,0000 [%]		

Abbildung 31: Berechnung der Scheitelabflüsse nach Lutz. Die Ausgangsparameter wurden durch Auswertung der Topographischen Karte im Maßstab 1:50.000 ermittelt.

Welche Regendauer mit bestimmter Jährlichkeit zum größten Abfluss führt, kann vorher nur über die Konzentrationszeit abgeschätzt werden. Um das Maximum für die gewünschte Wiederholungszeit zu erhalten, müssen unterschiedliche Regen angesetzt werden.

Einen ähnlichen Ansatz verfolgt auch das Soil Conservation Service Verfahren (SCS). Aufgrund unterschiedlicher klimatischer Verhältnisse in Amerika liefert es jedoch in seiner ursprünglichen Fassung durchschnittlich zu niedrige Abflüsse, da die Anfangsverluste (Infiltration, Interzeption, Verdunstung) in Mitteleuropa geringer ausfallen ([20] MANIAK, 1997, S.298).

Eine Weiterentwicklung des Lutz-Verfahrens stellt das IHW-Abfluss der Universität Karlsruhe dar. Mit diesem Programm können unter anderem Ganglinien der untersuchten Hochwasserereignisse berechnet werden.

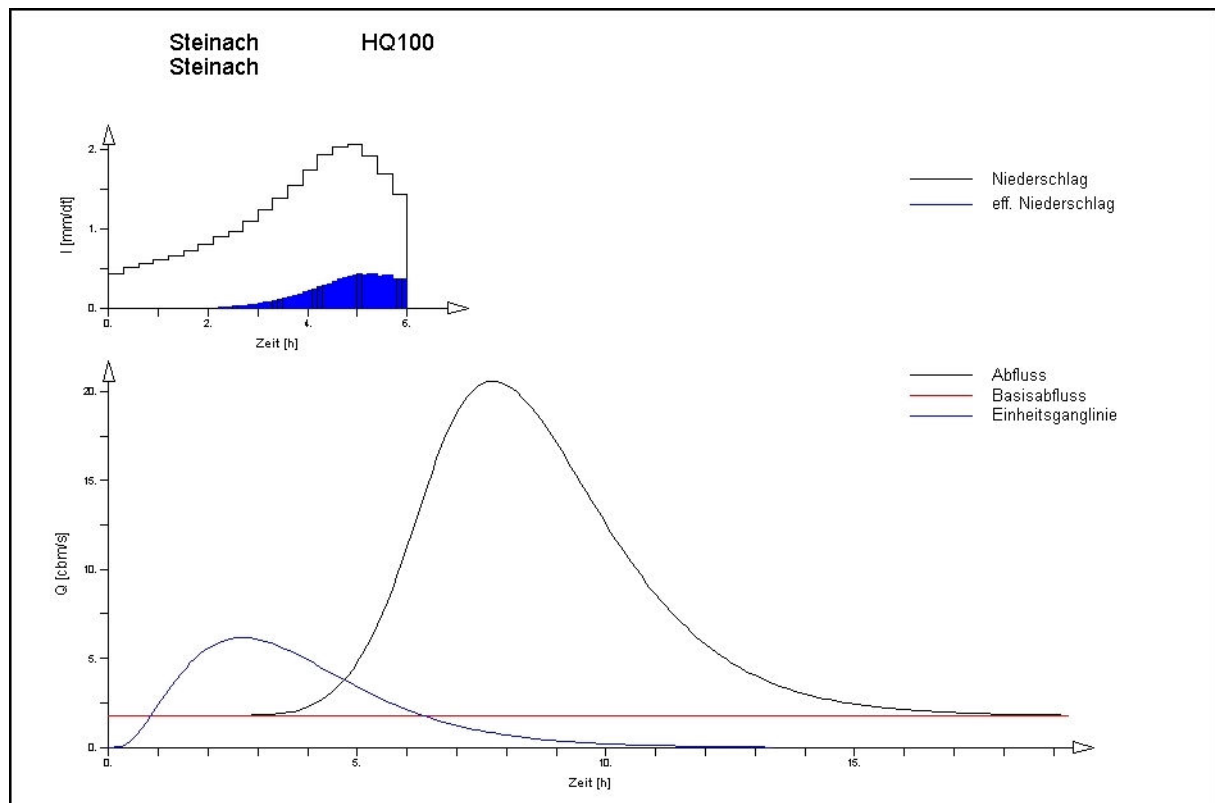


Abbildung 32: Ermittlung der Hochwasser-Ganglinie mit dem Programm IHW-Abfluss.

6.6 Stochastische Modelle

Die genauesten Aussagen über die Wiederkehrzeiten von Abflussmaxima können derzeit nur aus der statistischen Auswertung von langjährigen Pegelmessungen gezogen werden, da Pegelaufzeichnungen den realen Verlauf der Gewässerabflüsse dokumentieren. Aus diesem Grund wurde für das Referenzgebiet das Einzugsgebiet des Pegels in der Ortschaft Steinach/Thüringen gewählt, um erhaltene Modellergebnisse besser bewerten zu können.



Abbildung 33: Schreib- und Online-Hochwassermeldepegel in Steinach am Gewässer Steinach. Foto R. Stahlmann, 20.08.2004

Die Qualität einer Hochwasserstatistik hängt jedoch nicht nur von einer akribischen, möglichst langjährigen Abflussdokumentation ab. Sie wird bestimmt durch die Veränderung ihres Einzugsgebietes. So gibt es heutzutage kaum noch Pegelmessstellen, in deren Oberläufen keine Trinkwasserspeicher und Hochwasserrückhaltebecken errichtet oder größere Gebiete versiegelt wurden. Insbesondere Talsperren stellen eine große Herausforderung für die Abflussstatistik dar, da aus Einlauf- und Auslaufpegeln dieser Bauwerke Rückschlüsse für Pegelmessungen weit unterhalb liegender Pegel gezogen werden müssen.

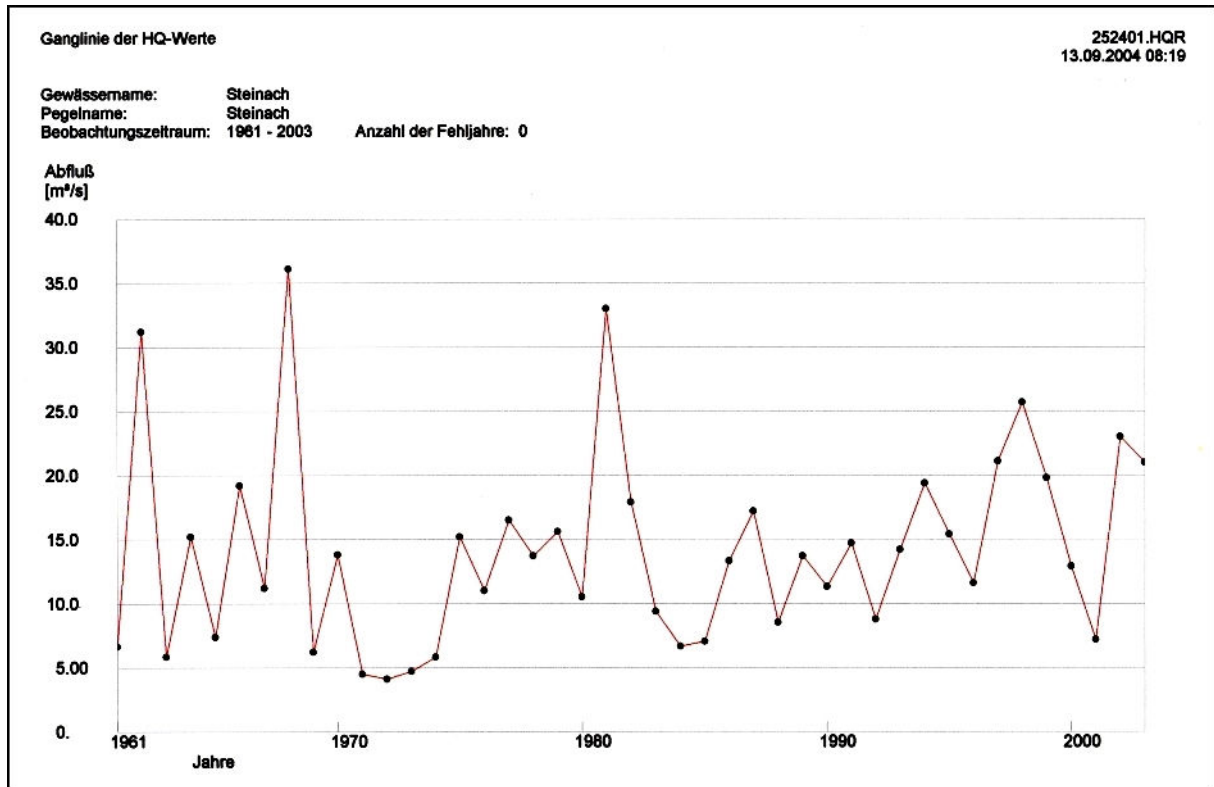


Abbildung 34: Jahresabflussmaxima am Pegel Steinach/Steinach. Ausdruck aus dem Hochwasserstatistikprogramm HQ-Ex® des Staatlichen Umweltamtes Suhl.

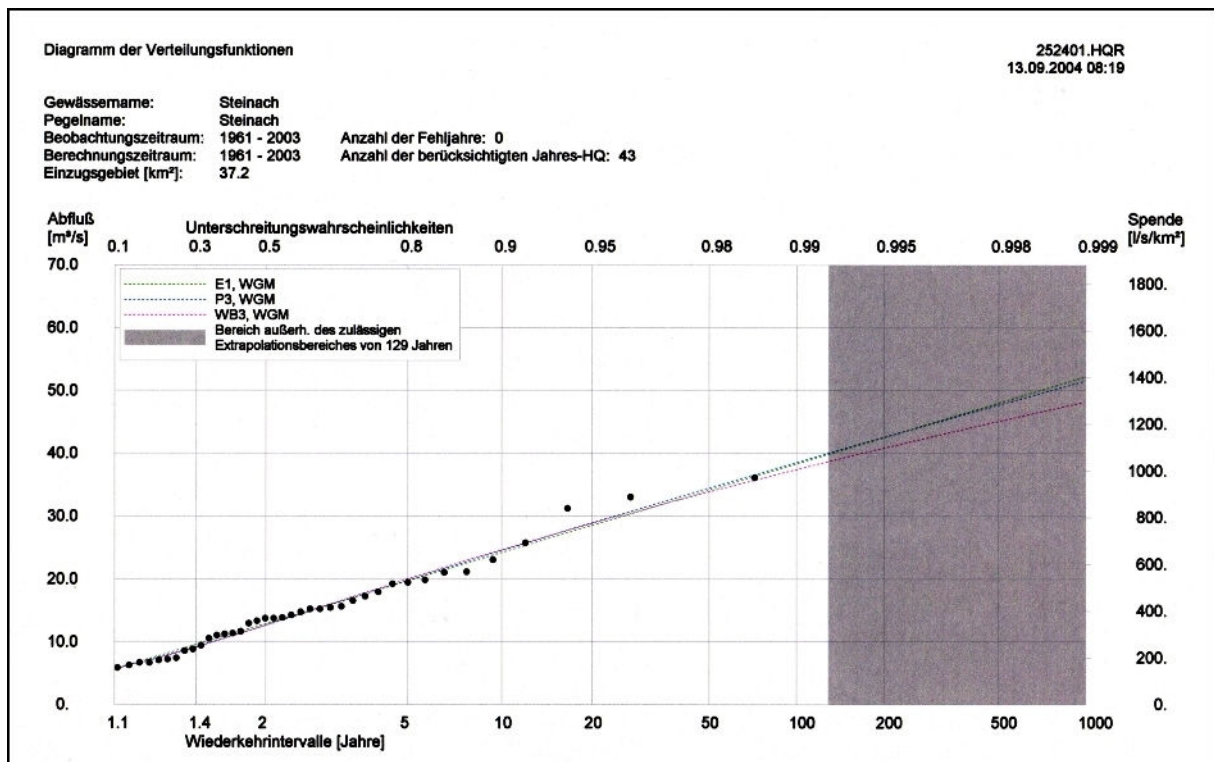


Abbildung 35: Verteilungsfunktion der drei bestangepassten Verteilungskurven (Extremwert Typ 1, Pearson Typ III und Weibull-III Verteilung) für den Pegel Steinach/Steinach. Ausdruck aus dem Hochwasserstatistikprogramm HQ-Ex® des Staatlichen Umweltamtes Suhl.

Wiederkehrintervalle		252401.HQR 13.09.2004 08:17									
Gewässername:	Steinach										
Pegelname:	Steinach										
Beobachtungszeitraum:	1961 - 2003	Anzahl der Fehljahre: 0									
Berechnungszeitraum:	1961 - 2003	Anzahl der berücksichtigten Jahres-HQ: 43									
Abfluß [m³/s]											
Verteilungs- funktion	Schätz- methode	Wiederkehrintervalle [Jahre]									
		2	5	10	20	25	50	100	200	500	1000
E1	MM	12.9	19.6	24.0	28.3	29.7	33.8	38.0	42.1	47.5	51.7
	MLM	12.8	19.3	23.6	27.7	29.0	33.0	37.0	41.0	46.2	50.2
	WGM	12.9	19.7	24.2	28.5	29.9	34.1	38.3	42.5	48.0	52.2
AE	MM	12.9	19.7	24.1	28.3	29.6	33.7	37.7	41.7	46.9	50.8
	MLM	12.6	19.2	23.9	28.7	30.3	35.4	40.7	46.3	54.2	60.6
	WGM	12.6	19.4	24.2	28.8	30.4	35.1	40.1	45.1	52.1	57.5
ME	MLM	12.5	19.1	23.8	28.6	30.2	35.3	40.7	46.3	53.9	59.7
LN3	MM	12.5	19.2	23.9	28.5	30.0	34.7	39.6	44.6	51.6	57.0
	MLM	12.3	19.3	24.5	29.8	31.5	37.1	42.9	49.1	57.7	64.7
	WGM	12.6	19.6	24.3	28.8	30.3	34.9	39.6	44.3	50.7	55.8
P3	MM	12.5	19.6	24.3	28.7	30.1	34.4	38.5	42.5	47.8	51.7
	MLM	12.0	19.7	25.1	30.3	32.0	37.1	42.1	47.1	53.6	58.5
	WGM	12.6	19.8	24.5	28.9	30.3	34.5	38.5	42.5	47.7	51.5
LP3	MM	12.5	19.5	24.4	29.3	30.9	35.9	40.9	46.0	53.0	58.4
WB3	MM	12.6	19.9	24.5	28.8	30.1	33.9	37.5	41.0	45.3	48.5
	MLM	12.3	19.8	24.8	29.5	30.9	35.2	39.4	43.4	48.5	52.2
	WGM	12.6	20.0	24.6	28.8	30.1	33.9	37.4	40.8	45.1	48.2

Abbildung 36: Maximalabflüsse unterschiedlicher Verteilungsfunktionen und Schätzmethoden in Abhängigkeit ihrer Wiederkehrzeit . Ausdruck aus dem Hochwasserstatistikprogramm HQ-Ex® des Staatlichen Umweltamtes Suhl.

Zum Vergleich der Modellergebnisse sollten die Abflüsse der Verteilungsfunktion Extremwert Typ 1 (E1, Schätzmethode WGM) herangezogen werden, da sich die real gemessenen Abflüsse dieser Kurve am besten anpassen.

6.7 Vergleichende Gegenüberstellung

	HW- Statistik			Lauterbach Glos				Lutz-Verfahren			
	Extremwert Typ 1 Verteilung	Pearson Typ III Verteilung	Weibull-III Verteilung	Berechnung anhand Topographischer Karte 1:50.000		Verwendung von DHM		Berechnung anhand Topographischer Karte 1:50.000		Verwendung von DHM	
Dimensionen											
Zufall											
deterministisch	-	-	-	x		x		x		x	
stochastisch	x	x	x	-		-		-		-	
Raum											
räumlich aggregiert	x	x	x	x		x		x		x	
räumlich verteilt	-	-	-	-		-		-		-	
Zeit											
zeitunabhängig, stationär	x	x	x	x		x		x		x	
zeitkorreliert, instationär	-	-	-	-		-		-		-	
Ergebnisse											
HHQ	-	-	-	-		-		-		-	
HQx als Scheitelwert	x	x	x	x		x		x		x	
HQx als Ganglinie	-	-	-	-		-		(x)		(x)	
Berechnete Werte	m³/s	m³/s	m³/s	m³/s	%	m³/s	%	m³/s	%	m³/s	%
HQ2	12,9	12,6	12,6	10,9	-15,4%	10,9	-15,5%	7,5	-41,9%	5,3	-58,9%
HQ5	19,7	19,8	20,0	16,3	-17,2%	16,3	-17,1%	10,5	-46,9%	7,1	-64,0%
HQ10	24,2	24,5	24,6	21,4	-11,7%	21,4	-11,4%	13,0	-46,3%	8,4	-65,3%
HQ20	28,5	28,9	28,8	27,4	-3,9%	27,5	-3,5%	15,8	-44,6%	10,1	-64,6%
HQ25	29,9	30,3	30,1	29,6	-1,1%	29,7	-0,8%				
HQ50	34,1	34,5	33,9	37,0	8,6%	37,2	9,1%	19,7	-42,2%	12,3	-63,9%
HQ100	38,3	38,5	37,4	45,8	19,6%	46,1	20,2%	23,0	-39,9%	14,1	-63,2%
HQ200	42,5	42,5	40,8	56,0	31,6%	56,3	32,5%				

Tabelle 8: Gegenüberstellung der Berechnungsergebnisse und prozentuale Abweichung von der Hochwasserstatistik am Pegel Steinach/Steinach Extremwertverteilung Typ 1.

7 Interpretation der Ergebnisse

Viele wichtige Kennwerte wie Versiegelungsgrad, Landnutzung, mittlere Reliefenergie, usw. lassen sich mittels GIS exakter und nachvollziehbarer (im Sinne von wiederholbar) ermitteln als "von Hand", was sich auch auf die Qualität der Ergebnisse auswirkt. Jedoch bedeutet exakt nicht genau im Sinne einer absoluten Genauigkeit. Vielmehr kommt es darauf an, die Eingangparameter in der Weise zu ermitteln wie der Modellentwickler. Da die untersuchten Modelle aus einer Zeit stammen, in der der Einsatz von digitalen Geländemodellen noch nicht üblich war, konnten die Modellentwickler nur anhand topographischer Karten die Eingangswerte ermitteln und daraufhin ihre "Black-Box"-Modelle kalibrieren. Die Verwendung von genaueren Ausgangsparemtern, welche auf Grundlage des topographischen Ausgangsmaterials niemals möglich gewesen wären, führen somit zu schlechteren Modellergebnissen.

Aufgrund der enormen Komplexität der Abflussvorgänge scheint allein die Regionalisierung von Niederschlag, Landnutzung und Bodeneigenschaften nicht ausreichend für genaue Modellergebnisse nach dem Lutzverfahren zu sein. Es liefert durchweg zu niedrige Abflüsse, was bei Betrachtung der klimatischen Verhältnisse deutlich wird. Bei dem Referenzeinzugsgebiet handelt es sich um eine Mittelgebirgsregion, bei der die höchsten Abflüsse im Frühjahr zu verzeichnen sind. Das im Schnee gespeicherte Wasser kommt bei längeren Niederschlägen ebenfalls zum Abfluss, der Boden ist noch gefroren und kann kein Wasser aufnehmen. Auch der zeitliche Verlauf wird dadurch beeinflusst. Der vorhandene Schnee wirkt in der Anfangsphase als Schwamm. Beim Schmelzen wird der gefallene Niederschlag mit dem im Schnee gespeicherten Wasser abgegeben. Abhilfe für die Modellierung können hier nur eine zusätzliche Regionalisierung (wie bei Lauterbach/Glos) oder ein detaillierteres Modell schaffen.

Bei einigen Ausgangsparemtern wie der Einzugsgebietsgröße führen unterschiedliche Ermittlungsmethoden zu vergleichbaren Ergebnissen. Die Wahl der Vorgehensweise kann allein aufgrund der Zeit- und Datenkosten erfolgen. Bei anderen Parametern, wie der Bestimmung der Fließlänge des Gewässers, unterscheiden sich die Ergebnisse stark von der Methodik und vom Maßstab. Hier bestimmt das Modell, welche Art der Parameterermittlung zu wählen ist.

Die Abweichungen von der Hochwasserstatistik zeigen, dass es wenig Sinn macht Eingabeparameter genauer zu ermitteln als die Ergebnisse. Eine gewisse Verhältnismäßigkeit der Mittel ist anzuraten, was natürlich Erfahrungen mit dem verwendeten Modell voraussetzt. Weiterhin ist der Erkenntnis Rechnung zu tragen, dass es zur Extremabflussermittlung kein "richtiges" Berechnungsverfahren mit einer einzigen, eindeutigen Lösung geben kann, sondern eine größere Zahl gleichwertiger Verfahren mit einem Lösungsspektrum, aus dem der gesuchte Bemessungswert letztendlich festzulegen ist ([6] DVWK 251, 1999).

Da viele der heute verwendeten Modelle aus einer Zeit stammen, in der das topographische Kartenwerk der einzige Quelle zur Ermittlung vieler Parameter darstellte und vielfach deren Ableitung nicht klar dokumentiert ist, könnte es lohnend sein deterministische Modelle unter Verwendung standardisierter Algorithmen neu zu eichen. Dadurch könnten vom Bearbeiter unabhängige Modelle entstehen, die durch kontinuierliche raumbezogene Regionalisierungsparameter besser an die aktuelle Hochwasserstatistik angepasst sind und den Folgen der Klimaänderung besser Rechnung tragen können als statische Modelle.

8 Literaturverzeichnis

- [1] ADV, ARBEITSGEMEINSCHAFT DER VERMESSUNGSVERWALTUNGEN DER LÄNDER (2004-10-03): *Startseite*. – <http://www.adv-online.de/extdeu/>.
- [2] BMU, BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT, Hrsg. (1997): *Stand und Einsatz mathematisch-numerischer Modelle in der Wasserwirtschaft*. – Bundesanstalt für Gewässerkunde, Selbstverlag Koblenz, 52 S.
- [3] CHOW, V.-T. et al. (1964): *Handbook of Applied Hydrology: A Compendium of Water-resources Technology*. – McGraw Hill Book Company, New York, usw., 1418 S.
- [4] DVWK 112, DEUTSCHER VERBAND FÜR WASSERWIRTSCHAFT UND KULTURBAU E.V., Hrsg. (1990): *Arbeitsanleitung zur Anwendung von Niederschlag-Abfluß-Modellen in kleinen Einzugsgebieten, Teil I. Analyse: DK 556.161.072 Niederschlag-Abfluß-Modelle, DK 556.51.028 Kleineinzugsgebiete*. – 2., durchgesehene Auflage, Verlag Paul Parey, Berlin, 35 S.
- [5] DVWK 113, DEUTSCHER VERBAND FÜR WASSERWIRTSCHAFT UND KULTURBAU E.V., Hrsg. (1990): *Arbeitsanleitung zur Anwendung von Niederschlag-Abfluß-Modellen in kleinen Einzugsgebieten, Teil II. Synthese: DK 556.161.072 Niederschlag-Abfluß-Modelle, DK 556.51.028 Kleineinzugsgebiete*. – 2., durchgesehene Auflage, Verlag Paul Parey, Berlin, 34 S.
- [6] DVWK 251, DEUTSCHER VERBAND FÜR WASSERWIRTSCHAFT UND KULTURBAU E.V., Hrsg. (1999): *DVWK-Merkblatt 251/1999: Statistische Analyse von Hochwasserabflüssen*. – ?, durchgesehene Auflage, Verlag ?, ? S.
- [7] DWD: DEUTSCHER WETTERDIENST, Hrsg. (1997): *Kostra-Atlas: Koordinierte Starkniederschlags-Regionalisierungs-Auswertungen - Starkniederschlagshöhen für Deutschland*. – Selbstverlag, Offenbach am Main, 29 S. und 55 Karten.
- [8] ESRI: ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE, INC., Hrsg. (1996): *ArcView GIS. The Geographical Information System for Everyone*. – Selbstverlag, Atlanta, 340 S.

- [9] FÜRST, J. (2004): *GIS in Hydrologie und Wasserwirtschaft*. – 1. Aufl., Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, 336 S.
- [10] HÄCKEL, H. (1993): *Meteorologie*. – UTB für Wissenschaft: Uni-Taschenbücher, Bd.1338, 3., verb. Aufl., Ulmer Verlag, Stuttgart, 402 S.
- [11] HEINEMANN, E., STROHMEIER, A. (2002): *Wasserwirtschaft*. – In: WETZELL, W. (Hrsg.): Wendehorst - Bautechnische Zahlentafeln – 30., aktualisierte und erweiterte Auflage, Teubner Verlag, Stuttgart, S.1019-1148.
- [12] HIEKEL, W. (1994): *Naturräume Thüringens*. – In: THÜRINGER LANDESANSTALT FÜR UMWELT (Hrsg.): Wissenschaftliche Beiträge zum Landschaftsprogramm Thüringens, Schriftenreihe Nr. 2/94, Selbstverlag, Anlagen 1 u. 2, Jena.
- [13] JÜRGENS, C. (1999): *Anwendung des hydrologischen Einzugsgebietsmodells "Answers" unter Einbeziehung von Fernerkundungs- und Gis-Techniken zur Analyse des Effektes von Landnutzungsveränderungen auf das Abflussverhalten*. – In: STROBL, J. & BLASCHKE, T. (Hrsg.): Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XI, Beiträge zum AGIT-Symposium Salzburg 1999, Wichmann Verlag, Heidelberg, S.298-303.
- [14] LAHMER, W., PFÜTZNER, B. (2000): *Scaling problems in large-scale hydrological modelling*. – VERHOEST, N.E.C., VAN HERPE, Y.J.P. UND DE TROCH, F.P. (Hrsg.): Monitoring and Modelling Catchment Water Quantity and Quality. Conference proceedings. Laboratory of Hydrology and Water Management, Ghent University, Ghent, Belgium, S.95-99.
- [15] LAUTERBACH, D., GLOS, E. (1965): *Ein Beitrag zur Berechnung von Hochwasserscheitelwerten unter Berücksichtigung der Häufigkeit des Auftretens*. – In: INSTITUT FÜR WASSERWIRTSCHAFT BERLIN (Hrsg.): Besondere Mitteilungen zum Gewässerkundlichen Jahrbuch der Deutschen Demokratischen Republik Nr. 3/65, VEB Verlag für Bauwesen, Berlin, S. 7-42.
- [16] LECHER, K., LÜHR, H.-P., ZANKE, U. C. E., Hrsg. (2001): *Taschenbuch der Wasserwirtschaft*. – 8., völlig neubearbeitete Aufl., Parey Buchverlag, Berlin, 1202 S.

- [17] LUTZ, W. (1984): *Berechnung von Hochwasserabflüssen unter Anwendung von Gebietskenngrößen*. – 1. Aufl., Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft Universität Karlsruhe (TH), 235 S.
- [18] MANDELBROT, B. (1987): *Die fraktale Geometrie der Natur*. – Birkhäuser Verlag, Basel, 491 S.
- [19] MAIDMENT, D. R. (2002): *ArcHydro: GIS für Water Resources*. – ESRI Verlag, Redlands, 203 S.
- [20] MANIAK, U. (1997): *Hydrologie und Wasserwirtschaft. Eine Einführung für Ingenieure*. – 4., überarbeitete und erweiterte Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 650 S.
- [21] MEHLHORN, G. (1996): *Der Ingenieurbau - Grundwissen, 9 Bde., Bd. 2: Hydrotechnik / Geotechnik*. – Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 575 S.
- [22] NETELER, M. (2000): *GRASS-Handbuch. Der praktische Leitfaden zum Geographischen Informationssystem GRASS*. – In: Geosynthesis, Heft 11, Physische Geographie und Landschaftsökologie, Universität Hannover, 247 S.
- [23] RAU, D., SCHRAMM, H., WUNDERLICH, J. (2000): *Die Leitbodenformen Thüringens*. – In: THÜRINGER LANDESANSTALT FÜR GEOLOGIE (Hrsg.): Geowissenschaftliche Mitteilungen von Thüringen, Beiheft 3, 2., überarbeitete und erweiterte Auflage, Selbstverlag, Weimar, 100 S.
- [24] SCHÄUBLE, H. (2004): *Dokumentation von HydroTools 1.0, eine Erweiterung für ArcView 3.x und den Spatial Analyst 1.x*. – PDF-Datei: hydrotools_deu.pdf, Erstellt am 16.05.2004, Institut für Angewandte Geowissenschaften, Technische Universität Darmstadt, 12 S.
- [25] SCHRÖDER, W., EULER, G., SCHNEIDER, K. (1994): *Grundlagen des Wasserbaus. Hydrologie, Hydraulik, Wasserrecht*. – 3., völlig überarbeitete Auflage, Werner Verlag, Düsseldorf, 259 S.
- [26] SEIDEL, G. (1995): *Geologie von Thüringen*. – E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 556 S.

- [27] STAUDENRAUSCH, H. (1997): *Entwicklung und Evaluierung von Netzwerktopologien für homogene hydrologische Modelleinheiten durch GIS-Methoden.* – In: DOLLINGER, F., & STROBL, J. (Hrsg.): *Angewandte Geographische Informationsverarbeitung IX.* Beiträge zum GIS-Symposium 2.-4. Juli 1997. Salzburger Geographische Materialien, Heft 26. Salzburg, S.153-162.
- [28] THIEKEN, A., LÜCKE, A., DIEKKRÜGER, B. (1997): *Einfluss von Datenqualität und DHM-Analysen auf die Ergebnisse eines Oberflächenabflussmodells.* – In: DOLLINGER, F., & STROBL, J. (Hrsg.): *Angewandte Geographische Informationsverarbeitung IX.* Beiträge zum GIS-Symposium 2.-4. Juli 1997. Salzburger Geographische Materialien, Heft 26. Salzburg, S.153-162.
- [29] TLVERMA, THÜRINGER LANDESVERMESSUNGSAMT (2004-09-28): *Homepage des Thüringer Landesvermessungsamtes* – <http://www.thueringen.de/de/vermessung>.
- [30] TKVV - THÜRINGER KATASTER- UND VERMESSUNGSVERWALTUNG (2000): *CD-Top50, Thüringen Amtliche Topographische Karten 1:50.000* - Version 3.0, Selbstverlag, Erfurt.
- [31] VISCHER, D., HUBER, A. (1993): *Wasserbau. Hydrologische Grundlagen, Elemente des Wasserbaus, Nutz- und Schutzbauten an Binnengewässern (Springer-Lehrbuch).* – 5. vollst. überarb. und erw. Aufl., Springer Verlag, Berlin, 360 S.
- [32] WAGENBRETH, O., STEINER, W. (1990): *Geologische Streifzüge.* – 4. unveränderte Aufl., Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 204 S.

Anhang

Glossar

- Grid** siehe Raster
- HRU** Hydrological Response Units = Hydrologische Reaktions-Einheiten sind gegliederte Modelleinheiten vergleichbarer hydrologischer Eigenart, die durch ähnliche Landnutzung und Topographie sowie pedologische und geologische Eigenschaften gekennzeichnet sind. Sie werden auch Hydrotope genannt (Analogie zu Biotop).
- Metadaten** Daten über die Daten: Information über Daten und Dokumentation von Daten mit dem Ziel sie nachvollziehbar und wiederverwertbar für andere Nutzer zu machen. Wichtige Angaben sind z.B. Genauigkeit der Daten, vorgenommene Generalisierungen, Lage im zu bezeichnenden Koordinatensystem, Art der Projektion, Datum der Datenerhebung, Ursprung der Daten, u. v. m.
- Raster** Rasterstrukturen basieren auf einer regelmäßiger Matrix von Zellen, wovon jede einen Attributwert besitzen kann. Bekannte Vertreter sind Computerbilder bei denen das Attribut den Farbwert der einzelnen Zelle = Pixel (Picture element) darstellt. In GIS werden Raster zur Speicherung und Berechnung räumlich-kontinuierlicher Daten verwendet. Bekannte Speicherformen stellen die GRID-Derivate der Firma ESRI™ dar.
- Voxel** Volume pixel. Während man flächige Rasterzellen als Pixel (Picture element) bezeichnen kann, wird das dreidimensionale Pendant Voxel genannt. Es ist nicht zu verwechseln mit Rasterstrukturen, die ein Z-Höhenattribut besitzen, sondern es handelt sich um einen echten dreidimensionalen Körper, der eine Würfel- oder Kugelform besitzen kann.

Tabellen

Abfluss – Modelle ([2] BMU, 1997, S.7f ergänzt durch Internetrecherche)

NAME	ENTWICKLER
AKWA-M	TU Dresden, Hydrologie und Meteorologie
AMBETI	Deutscher Wetterdienst, Braunschweig
ArcEgmo	BAH, Büro für angewandte Hydrologie, Berlin
ASGI	Univ. der Bundeswehr München, Wasserwirtschaft
BASINL	SHW, Sozietät für Hydrologie und Wasserwirtschaft, Weste
BCENA	Björnsen Beratende Ingenieure, Koblenz
CAMOS/EGMO	WASY GmbH, Berlin
CATchment MOdel	RWTH Aachen, Wasser-Energie-Wirtschaft
DIFGA	TU Dresden, Hydrologie und Meteorologie
DIKASOS	Universität Karlsruhe, Siedlungswasserwirtschaft
EGMO	PIK, Potsdamer Institut für Klimafolgenforschung EV
PAREI/EGLSYN	Landesamt für Wasserwirtschaft, Bayern, München
EZGM (NIEDER)	Björnsen Beratende Ingenieure, Erfurt
FGM	Univ. Karlsruhe, Hydrologie und Wasserwirtschaft (IHW), (neuer Name:
FGMOD	Ingenieurbüro Dr. Ludwig, Karlsruhe
FGMOD	Landesanstalt für Umweltschutz, Baden Württemberg, Karlsruhe
FGMOD	UNI Hannover, Wasserwirtschaft, Hyd. und landwirtschaftl. Wasserbau
GEOFEM	Landesanstalt für Umwelt, Thüringen, Jena
HAMOKA	Universität Karlsruhe, Siedlungswasserwirtschaft
HEC-GeoHMS 1.1	Hydrologic Engineering Center, US Army Corps of Engineers, eine Weiterentwicklung von HEC-1, http://www.hec.usace.army.mil/
HEC-WMS 7	Scientific Software Group, http://www.scisoftware.com , auch eine Weiterentwicklung von HEC-1.
H.-KOSMO	Universität Kaiserslautern, Siedlungswasserwirtschaft
HWM Bochum	Ruhr-Universität Bochum, Hyd., Wasserwirtschaft und Umwelttechnik
HWA	SHW, Sozietät für Hydrologie und Wasserwirtschaft, Weste
HYBNAT	Brandt - Gerdes - Sitzmann GmbH, Darmstadt - Eberstadt
HYDRO	Universität - Gesamthochschule Essen, Siedlungswasserwirtschaft

HYDROCAT	AEW Plan GmbH, Köln
HYDROSIM	Ingenieurbüro Fischer, Solingen
HYSYS	Ingenieurbüro Fischer, Solingen
IHW-ABFLUSS	Univ. Karlsruhe, Wasserwirtschaft u. Kulturtechnik
KAVEM	Universität Karlsruhe, Siedlungswasserwirtschaft
KQUH	SHW, Sozietät für Hydrologie und Wasserwirtschaft, Weste
LANGEMOD	Hartung + Partner GmbH, Braunschweig
LARSIM	Ingenieurbüro Dr. Ludwig, Karlsruhe
LASIKA	Universität Karlsruhe, Siedlungswasserwirtschaft
NAMC	CES, Consulting Engineers SALZGITTER GmbH
NAMLFW	Landesamt für Wasserwirtschaft, Rheinland - Pfalz, Mainz
NASIM	TH Darmstadt, Wasserbau, Ingenieurhydrologie und Hydraulik
NASMO	Leichtweiß-Institut für Wasserbau, TU Braunschweig
NAVMO 2	Universität der Bundeswehr München, Wasserwirtschaft, Neubiberg
NAVMO C	CES, Consulting Engineers SALZGITTER GmbH
NAXOS	Leichtweiß-Institut für Wasserbau, TU Braunschweig
P3D	SHW, Sozietät für Hydrologie und Wasserwirtschaft, Weste
PRAEDICT	Leichtweiß-Institut für Wasserbau, TU Braunschweig
RRFSSys	Universität Stuttgart, Wasserbau und Wasserwirtschaft
SMUSI	Universität Karlsruhe, Hydromechanik
TOPMODEL	Universität Lancaster
VERMO2	Bundesanstalt für Gewässerkunde, Berlin
WHM Bochum	Ruhr-Universität Bochum, Hyd., Wasserwirtschaft und Umwelttechnik
WESSO	TU Berlin, Ökologie, FG Bodenkunde

Tabellarischer Lebenslauf

Name: Stahlmann

Vorname: Reinhold

Geburtstag: 14.01.1972

Geburtsort: Bayreuth

Wohnort 1: 99718 Greußen, Paul-Lürmann-Str. 10

Tel.: 03636 / 79 26 62

Wohnort 2: 95511 Mistelbach, Bahnhofstr. 4

Tel.: 09201 / 79 90 00

Eltern: Fritz Stahlmann
Margarete Stahlmann, geb. Förster

Staatsangehörigkeit: deutsch

Familienstand: verheiratet mit Silke Stahlmann, geb. Petzold

Kinder: Lorenz Stahlmann

Schulbildung: Volksschule Mistelbach von 1978 bis 1982
Graf-Münster-Gymnasium Bayreuth von 1982 bis 1991

Schulabschluss: 1991 Abitur am Graf-Münster-Gymnasium

Zivildienst: An der Unteren Naturschutzbehörde am
Landratsamt Bayreuth in der Biotoppflege
vom 02.09.1991 bis 30.11.1992

Studium: Physik Dipl., Universität Bayreuth Wintersemester 1992/93 bis
Sommersemester 1993

Jägerprüfung: 25. März 1993

Fischerprüfung: 05. April 1994

Praktikum: Bei der Firma Feustel, Garten- und Landschaftsbau,
Bayreuth vom 21.06.1993 bis 10.09.1993

Ausbildung: Bei der Firma Feustel, Garten- und Landschaftsbau,
Bayreuth als Gärtner, Garten- und Landschaftsbau vom
13.09.1993 bis 12.09.1995

Gesellenprüfung: 1. August 1995

Gesellenzeit: September 1995

- Studium: Landschaftsarchitektur an der Fachhochschule Erfurt
01.10.1995 bis 02.07.1999
- Praktikum: 01.09.1997 bis 27.02.1998, Planungsbüro
Idea Verde, Adligenswil/Luzern
- Tutorentätigkeit: - Botanik/Pflanzensoziologie
- Ingenieurbiologie
- Sonstige Tätigkeiten: Floristisch-vegetationskundliche Kartierungen:
- Büro für Botanische Studien Naturschutzarbeit, Dr. J. Pusch
- Flora von Erfurt
- Studienabschluss: Dipl.-Ing. (FH) Landschaftsarchitektur
- Freiberufliche Tätigkeit: seit Juli 1999 im Bereich Landschaftsarchitektur in
Deutschland, Schweiz, Österreich und Italien
- Berufliche Tätigkeit: seit August 2000 im Büro für Ingenieurbiologie und Wasserbau
Johannsen und Spundflasch, Windmühle 1, 99718 Oberbösa
- Architektenkammer: Eintragung in die Bayerische Architektenkammer L.-Nr. 179.188
- Mitgliedschaften: - Gesellschaft für Ingenieurbiologie
- Bayerische Botanische Gesellschaft
- Thüringer Botanische Gesellschaft
- Sprachkenntnisse: Englisch, Französisch, Italienisch

Mistelbach, Oktober 2004

Eidesstattliche Versicherung

Ich versichere hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig angefertigt habe; die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Die Arbeit wurde weder einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt noch veröffentlicht.

Mistelbach, Oktober 2004