



^b
**UNIVERSITÄT
BERN**

CDE
CENTRE FOR DEVELOPMENT
AND ENVIRONMENT



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Volkswirtschafts-
departement EVD

Forschungsanstalt
Agroscope Reckenholz-Tänikon ART

Technisch-wissenschaftlicher Bericht

zur

Gewässeranschlusskarte

der Erosionsrisikokarte der Schweiz (ERK2)

im 2x2-Meter-Raster

von

Simon Alder (CDE Uni Bern)

Karl Herweg (CDE Uni Bern)

Hanspeter Liniger (CDE Uni Bern)

Volker Prasuhn (Agroscope Reckenholz-Tänikon ART)

**im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) und des Bundesamtes für
Landwirtschaft (BLW)**

Januar 2013

Impressum:

Auftrag: BAFU (H.U. Gujer), BLW (A. Candinas)

Projektbetreuung: K. Herweg (CDE Universität Bern), H.P. Liniger (CDE Universität Bern), V. Prasuhn (ART Reckenholz)

Technische Unterstützung: M. Fries, E. Hodel, J. Krauer (CDE Universität Bern)

Datengrundlagen: Erosionsrisikokarte (ERK2), Vector25 und Swisalti3D

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	v
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangslage.....	1
1.2 Auftrag und Ziel	2
1.3 Beschreibung der wichtigsten Begriffe	3
1.4 Aussagekraft und Limitierungen	4
2 Grundlagendaten	6
2.1 Erosionsrisikokarte ERK2.....	6
2.2 Höhenmodell Swisalti3D.....	7
2.3 Vector25	8
3 Das Gewässeranschlussmodell.....	11
3.1 Direkter und indirekter Gewässeranschluss	11
3.2 Ablauf der Berechnung.....	13
3.2.1 Berechnung des Erweiterten Gewässernetzes	13
3.2.2 Abflussbremsende Elemente	17
3.2.3 Fliessakkumulationsberechnungen.....	18
3.2.4 Fliessdistanzberechnung.....	19
3.2.5 Verschneidung der Fliessdistanz mit der Erosionsrisikokarte.....	19
3.3 Plausibilisierung des Modells.....	22
4 Resultate und Analysen	26
4.1 Kartenbeschrieb Gewässeranschlusskarte	27
4.2 Direkte und indirekte Gewässeranschlusskarte	29
4.3 Wichtige Zwischenresultate der Berechnung.....	31
4.4 Berechnung verschiedener Statistiken zu den Karten	32
4.5 Datenabgabe Karten	34
5 Interpretationsbeispiele.....	35
5.1 Anschlusswahrscheinlichkeit und nicht angeschlossene Flächen	35
5.2 Direkt und indirekt angeschlossene Flächen	37

5.3	Das Erweiterte Gewässernetz	39
6	Ausblick.....	43
	Literaturverzeichnis	45
	Anhang	48

Abkürzungsverzeichnis

BLW	Bundesamt für Landwirtschaft
BAFU	Bundesamt für Umwelt
D8	Deterministic 8-Algorithmus
DINF	Deterministic Infinity-Algorithmus
DTM-AV	Digitales Terrainmodell der Amtlichen Vermessung
ERK2	Erosionsrisikokarte der Schweiz im 2x2 Meter Raster
ESRI	Environmental Systems Research Institute
GIS	Geographische Informationssysteme
LK25	Landeskarte 1:25'000
MFD	Multi Flow Directions-Algorithmus
MUSLE 87	Modified Universal Soil Loss Equation von 1987
SAGA	System für Automatisierte Geowissenschaftliche Analysen

Zusammenfassung

Der vorliegende Bericht beschreibt das Modell zur Identifizierung des Gewässeranschlusses von potenziell erosionsgefährdeten landwirtschaftlichen Flächen und zeigt ausgewählte Resultate. Die Grundlage für das Modell ist die Erosionsrisikokarte (ERK2). Der Stoffeintrag kann in der Schweiz entweder direkt, von Flächen die an das Gewässer angrenzen, oder indirekt, von Flächen die weiter vom Gewässer entfernt sind, aber über Einlaufschächte und Meteorwasserableitungen Anschluss haben, erfolgen.

Mit dem Gewässeranschlussmodell kann für jede Rasterzelle der ERK2 berechnet werden, ob sie eine hohe, mittlere, niedrige oder keine Anschlusswahrscheinlichkeit ans Gewässer hat. Die Berechnung erfolgt mit zwei verschiedenen Geographischen Informationssystemen (GIS), SAGA und ArcGIS. Als Eingangsdaten dienen die ERK2, das 2-Meter-Höhenmodell (Swissalti3D) und Vector25 von Swisstopo. Zunächst wird ein erweitertes Gewässernetz erstellt, welches aus definierten, entwässerten Strassen und Güterwegen, definierten Tiefenlinien und den Gewässern selbst besteht. Anschliessend wird die Fliessdistanz von jeder Rasterzelle des Höhenmodells zum erweiterten Gewässernetz berechnet und klassifiziert. Im letzten Schritt der Modellierung wird die ERK2 mit der Fliessdistanz verschnitten. Daraus wird die Anschlusswahrscheinlichkeit jeder Rasterzelle in vier Klassen abgeleitet.

Neben der Gewässeranschlusskarte wurde eine weitere Karte, die die Unterteilung des Gewässeranschlusses in direkten und indirekten Gewässeranschluss zeigt, erstellt. Von den berechneten 888'050 ha landwirtschaftlicher Fläche im Talgebiet und den Bergzonen 1 und 2 weisen mehr als die Hälfte (55%) einen potentiellen Gewässeranschluss auf. Dabei ist die Anschlusswahrscheinlichkeit bei 24% dieser Flächen hoch, bei 50% mittel und bei 26% niedrig. Bei den 55% potentiell angeschlossenen Flächen erfolgt der Eintrag bei 21% auf direktem Wege, bei 34% auf indirektem Weg über Strasseneinlaufschächte und Meteorwasserableitungen.

Die potentielle Gewässeranschlusskarte erosionsgefährdeter Flächen zeigt in einer Art „Worst-Case-Szenario“ (permanente Schwarzbrache, keine Pufferstreifen oder bauliche Massnahmen) Flächen auf, auf denen bei nicht standortgerechter Bewirtschaftung mit einer erheblichen Gefahr für Stoffeinträge in Gewässer gerechnet werden muss. Sie bildet damit ein Hilfsmittel für eine zielgerichtete Massnahmenplanung im Gewässerschutz, sei es auf der angeschlossenen erosionsgefährdeten Parzelle selbst oder für die Anlage geeigneter Pufferstreifen oder anderer baulicher Massnahmen an der Übertrittsstelle ins Gewässer.

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Die Erosionsrisikokarte der landwirtschaftlichen Nutzfläche im 2x2-Meter-Raster (ERK2) wurde im Auftrag des Bundesamtes für Landwirtschaft (BLW) in den letzten Jahren in einer Kooperation von CDE Bern und ART Reckenholz entwickelt (Gisler et al. 2010). Sie zeigt das potenzielle Erosionsrisiko der gesamten landwirtschaftlichen Nutzfläche der Schweiz in einer 2-Meter-Auflösung in Tonnen Bodenmaterial pro Hektar pro Jahr. Mit der potenziellen Menge Bodenerosionsmaterial beziffert die Karte die Schäden, die auf dem jeweiligen Feld durch Bodenerosion theoretisch - unter Annahme eines permanent unbedeckten Bodens - möglich sind (On-Site-Schäden). Mobilisiertes Bodenmaterial, das über das Feld hinaus transportiert wird, kann aber auch abseits des Feldes zu grossen Schäden führen, indem es ins Gewässer oder in Siedlungsgebiet gelangt (Off-Site-Schäden). Während sich On-Site-Schäden einigermassen beziffern lassen, ist das Ausmass der Off-Site-Schäden bei einem Erosionsereignis häufig unbekannt oder schwierig einzuordnen (Ledermann et al. 2010). Dies betrifft im Besonderen auch die Gewässer, denn 10-20% des erodierten Bodenmaterials gelangen in der Schweiz ins nächste Gewässer (Mosimann et al. 1990; Prasuhn 2011). Mit dem Oberflächenabfluss und über Drainagen im Boden können zudem auf dem Feld ausgebrachte Dünger oder Pflanzenschutzmittel ins Gewässer gelangen und das dortige Ökosystem belasten. Im Rahmen der Massnahmenplanung nach der EU-Wasserrahmenrichtlinie sind erosionsbedingte Stoffeinträge in die Gewässer ein aktuelles Thema (vgl. Aurbacher et al. 2012).

Diverse Feldbeobachtungen in der Schweiz (Ledermann et al. 2010, Mosimann et al. 1990, Prasuhn 2011) haben gezeigt, dass Gewässereinträge von Erosionsmaterial und mitgeführten Nährstoffen und Pflanzenschutzmitteln auf direktem oder indirektem Weg erfolgen können: Flächen mit direktem Gewässeranschluss liegen neben dem Gewässer oder sind über temporär wasserführende Gräben oder Tiefenlinien ans Gewässer angeschlossen. Über Drainageschächte und Einlaufschächte der Strassen- und Güterwegentwässerung kann der Oberflächenabfluss auch indirekt ins Gewässer gelangen (Prasuhn und Grünig 2001). Insofern liegt in der Schweiz eine besondere Situation vor. Im Rahmen von Meliorationen wurden zahlreiche kleine Bäche eingedolt und mit Kontrollschächten versehen, und die meisten Strassen und Güterwege wurden über Einlaufschächte und Meteorwasserableitungen entwässert und mit einem Gewässer kurz geschlossen. Im benachbarten Ausland sind Strassen und Güterwege dagegen häufig entweder nicht entwässert oder das anfallende Oberflächenabflusswasser wird oft über seitlich verlaufende, offen Sickergräben zum Versickern gebracht. Besonders der indirekte Anschluss erschwert die Lokalisierung von Emissionsquellen eines verschmutzten Gewässers,

da dazu alle zum Gewässer zuführenden Meteorwasserableitungen und die daran angeschlossenen Flächen berücksichtigt werden müssten (Prasuhn 2005; Stamm et al. 2012).

Häufig stammen die grössten Stoffeinträge in ein Gewässer jedoch nur von einzelnen, angeschlossenen Feldern eines Einzugsgebietes. Wenn diese Sedimenthauptlieferflächen oder „Critical Source Areas“ erkannt werden, kann mit Reduktionsmassnahmen auf einem kleinen Teil der landwirtschaftlichen Fläche ein grosser Teil der Stoffeinträge ins Gewässer verhindert werden (Frey et al. 2011; Halbfass und Grunewald 2008).

Gewässeranschlusskarten bieten die Möglichkeit, landwirtschaftliche Flächen, die potenziell ans Gewässer angeschlossen sind, zu ermitteln. Bisher bestehen in der Schweiz Gewässeranschlusskarten, mit Ausnahme derjenigen des Kantons Basel-Landschaft (Bug und Mosimann 2011, abrufbar unter: <http://geoview.bl.ch/>), nur für kleinere Einzugsgebiete (Burgos und Noll 2010; Gassmann 2011, Prasuhn und Grünig 2001, Doppler et al. 2012). Je grösser das Gebiet ist, in dem die ans Gewässer angeschlossenen Flächen ermittelt werden sollen, desto einfacher müssen die Eingangsparameter des Modells sein. Das Modell, das für die Berechnung der Gewässeranschlusskarte verwendet wird, braucht aus diesem Grund mit der Erosionsrisikokarte, dem 2-Meter-Höhenmodell und Daten zu Gewässer- und Strassennetz konstante Eingangsparameter, die sich über die Zeit nicht verändern (Alder 2012). Somit wird die aktuelle Landnutzung nicht berücksichtigt.

1.2 Auftrag und Ziel

Das vorliegende Projekt zur Berechnung des Gewässeranschlusses potenziell erosionsgefährdeter Flächen der Erosionsrisikokarte der Schweiz (ERK2) basiert auf der Masterarbeit von Alder (2012) und ist ein Auftrag von BLW und BAFU ans CDE Uni Bern mit nachfolgendem Ziel:

„Für die Fläche der ERK2 werden digitale Karten des potenziellen Gewässeranschlusses erstellt. Die Karten zeigen im 2x2m-Raster die Wahrscheinlichkeit an, ob ein direkter oder indirekter (über Einlaufschächte) Eintrag von Erosionsmaterial zu erwarten ist. Grundlage bildet die ERK2, ergänzt um ein erweitertes Gewässernetz. Die Berechnung erfolgt einheitlich für die ganze Schweiz. Dies bedeutet verschiedene Generalisierungen. Bezüglich Genauigkeit und Fehlermöglichkeiten gelten die gleichen Bedingungen wie bei der ERK2. Die Modellierung des potenziellen Gewässeranschlusses stellt ein Hilfsmittel für den Vollzug gesetzlicher Grundlagen dar (z.B. Gewässerschutzgesetz, Umweltschutzgesetz, Landwirtschaftsgesetz). Im Schadensfall ist – wie bei der ERK2 – eine Überprüfung im Feld zwingend erforderlich.“

Der Ablauf der Berechnung und die Klassierung der Karte wurden an zwei Treffen mit verschiedenen Experten besprochen (J.-P. Clément (BAFU), H.U. Gujer (BAFU), A. Candinas (BLW), H.P. Liniger (CDE Universität Bern), K. Herweg (CDE Universität Bern) und V. Prasuhn (ART Reckenholz)).

1.3 Beschreibung der wichtigsten Begriffe

Gewässernetz: Oberflächengewässer, die in Vector25 vorhanden sind.

Erweitertes Gewässernetz: Das erweiterte Gewässernetz enthält zusätzlich modellierte, eingedolte Bäche, definierte Tiefenlinien, in denen Oberflächenabfluss zu erwarten ist, sowie definierte Strassen und Güterwege mit Einlaufschächten, die für Oberflächenabfluss und Stofftransport ins Gewässer relevant sein können.

Gewässeranschluss: Landwirtschaftliche Flächen, von denen durch Oberflächenabfluss und Bodenerosion Stoffe in Oberflächengewässer gelangen können, haben einen Gewässeranschluss (Konnektivität). Da die ERK2 Grundlage ist, bezieht sich der Gewässeranschluss in der vorliegenden Arbeit nur auf Bodenerosion von Ackerflächen und gilt nicht für Abschwemmung von Grasland, Stoffverluste durch Drainagen oder Stofftransport ins Grundwasser.

Direkter Gewässeranschluss: Flächen eines Feldblocks, der an ein Oberflächengewässer grenzt und deren Stofftransport flächenhaft oder konzentriert (Tiefenlinie, Talweg) auf direktem Weg in das Gewässer erfolgt. Der Transport kann dabei über mehrere Felder innerhalb eines Feldblocks erfolgen, nicht aber über mehrere Feldblöcke.

Indirekter Gewässeranschluss: Flächen eines Feldblocks, der an Strassen oder Güterwege grenzt, die über Einlaufschächte und Meteorwasserableitungen mit dem Gewässer verbunden sind, und deren Stofftransport flächenhaft oder konzentriert (Tiefenlinie, Talweg) auf eine solche Strasse oder einen Güterweg erfolgt.

Potentieller Gewässeranschluss: Flächen, von denen theoretisch (fliessakkumulationsbedingt) Stoffeintrag ins Gewässer direkt oder indirekt erfolgen kann; ohne Berücksichtigung der aktuellen Vegetationsbedeckung (vgl. potentielles Erosionsrisiko) und der Filterwirkung allfälliger Pufferstreifen und baulicher Massnahmen (Wasserableitungen, Gräben etc.), es sei denn, diese sind explizit in Vector25 bzw. der ERK2 als Bremsen aufgeführt. Klimatisch werden - zusätzlich zu der in der ERK2 Karte berücksichtigten regionalen Erosivität der Niederschläge - für die Einstufung der Fliessdistanzen mitt-

lere bis grosse Niederschlags- bzw. Erosionsereignisse zu Grunde gelegt, nicht jedoch Extrem- oder Jahrhundertereignisse, bei denen nahezu alle Flächen potentiell abflussbeitragend sind.

Anschlusswahrscheinlichkeit: Eine auf Annahmen und Expertenwissen basierende Einstufung des potentiellen Gewässeranschlusses. Die vier Klassen (keine, geringe, mittlere oder hohe Anschlusswahrscheinlichkeit) zeigen, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein potentieller Stoffeintrag aus einer landwirtschaftlichen Fläche in ein Gewässer vermutlich erfolgt bzw. wie gross das Risiko einer Gewässerbelastung aus dieser Fläche ist.

1.4 Aussagekraft und Limitierungen

Die Gewässeranschlusskarte zeigt das potenzielle Risiko, mit dem eine landwirtschaftlich genutzte Fläche an ein Gewässer angeschlossen ist, von der mobilisiertes Erosionsmaterial in ein Gewässer gelangen kann. Das Modell braucht folgende Eingangsdaten:

- Informationen über Gewässer- und Strassen- bzw. Güterwegenetz und Strassenklassen.
- Das potenzielle Erosionsrisiko der landwirtschaftlichen Nutzfläche.
- Ein 2x2-Meter Höhenmodell für die Berechnung von Hangneigung und Fliessakkumulation.

Da die Gewässeranschlusskarte eine Zusatzkarte zur ERK2 ist - also für jede Rasterzelle der ERK2 ermittelt wird, ob sie ans Gewässer angeschlossen ist - müssen zur Berechnung auch die gleichen Grundannahmen wie in der ERK2 getroffen werden. Dies betrifft einerseits die räumliche Ausdehnung der Karte, die über die gesamte landwirtschaftliche Nutzfläche reicht und nicht nur über die von Bodenerosion hauptsächlich betroffenen Ackerflächen. Andererseits betrifft es die Pufferstreifen verschiedener Objekte wie Strassen, Gewässer und Wald und die abflussbremsende Wirkung von Hecken, Gebäuden und Wald (Gisler et al. 2010). Zudem werden die Landnutzung, die Bodenbearbeitung und -bewirtschaftung für die Ermittlung des Gewässeranschlusses wie in der ERK2 ausgeklammert. Die Karte zeigt somit den potenziellen Gewässeranschluss: es wird angenommen, dass alle landwirtschaftlichen Nutzflächen unbedeckt sind (permanente Schwarzbrache) und keine Filterwirkung durch allfällige Pufferstreifen oder bauliche Massnahmen (Wasserableitungen, Gräben etc.) existieren – sofern diese nicht explizit in Vector25 als bremsende Elemente erfasst wurden.

Wenn die ans Gewässer angeschlossenen Flächen eines Einzugsgebietes ermittelt werden sollen, können mit der Karte alle Felder mit einem potenziellen Gewässeranschluss ausgeschieden werden. Um danach vom potenziellen auf den aktuellen Gewässeranschluss zu kommen, braucht es Informationen über die Nutzung der gefährdeten Flächen und allfällige abflussvermindernde Massnahmen. Diese müssen im Feld erhoben werden. Dadurch kann abgeklärt werden, ob die Landnutzung oder die Be-

wirtschaftung das Erosionsrisiko und/oder den Gewässeranschluss vermindert oder aufhebt. Falls die ausgeschiedenen Flächen tatsächlich teilweise unbedeckt sind, können mit der Karte Übertrittszonen ermittelt werden, wo der Oberflächenabfluss ins Gewässer oder in Einlaufschächte fliesst. Werden dort erosionsvermindernde Massnahmen ergriffen, vermindern diese einerseits das Erosionsrisiko und andererseits die Einträge von Erosionsmaterial ins Gewässer.

Die Karte hat folgende Limitierungen, die entweder auf den Grundlagendaten oder den Modellannahmen beruhen:

Für das Modell wurden Vector25-Daten verwendet, welche zum letzten Mal 2008 aktualisiert worden sind. Obwohl sich der Verlauf von Strassen und Gewässern kaum ändert, kann es sein, dass in der Zwischenzeit beispielsweise neue entwässerte landwirtschaftliche Güterwege gebaut wurden oder dass eine 5.-Klass-Strasse überwachsen ist und nicht mehr zum Strassennetz zählt. Für Vector25 wurden auch nicht alle Oberflächengewässer aufgenommen; kleinere, temporär wasserführende Gewässer sind meistens nicht enthalten.

Die meisten Fehler in der Gewässeranschlusskarte gibt es aber, weil grundlegende Annahmen getroffen wurden, die nicht immer der Realität entsprechen:

- Strassen/Güterwege, die im Modell als entwässert ausgeschieden sind, haben keine Einlaufschächte.
- Siedlungsgebiete werden von der Berechnung ausgeklammert.
- Einlaufschächte, von denen angenommen wird, dass sie das hineinfließende Wasser ins Gewässer weiterleiten, lassen das Wasser versickern oder verlangsamen den Abfluss so stark, dass sich mitgeführtes Sediment abgelagert.
- Strassen/Güterwege, die entwässert sind, werden vom Modell nicht als entwässert erkannt, wodurch das obenliegende Feld nicht als gefährdet ausgeschieden wird.
- Das angeschlossene Gebiet wird wegen der Multi Flow-Berechnung überschätzt.
- Die direkt angeschlossenen Flächen werden in grossen Feldblöcken überschätzt.
- Die Feldblöcke am Rand der Bergzone 2 zur Bergzone 3 werden grössenmässig überschätzt.
- Wasser kann nicht über die Feldblockgrenze hinaus in einen anderen Feldblock fließen.
- Alle Fehler der ERK2 (siehe Gisler et al. 2010) wie z.B. Feldblockgrenzen.
- Alle Annahmen gelten für mittlere bis grosse Niederschlagsereignisse, nicht aber für Extrem- oder Jahrhundertereignisse.

2 Grundlagendaten

Da das Gewässeranschlussmodell (Alder 2012) in erster Linie für die Schweiz erstellt wurde, basiert es auch auf Grundlagendaten, die für die Schweiz erhältlich sind. Dies trifft besonders auf die Attribute des Gewässer- und Strassennetzes zu, da in einem anderen Land beispielsweise andere Strassenklassen bestehen. Zum besseren Verständnis der Modellierung (siehe Kapitel 3), werden in diesem Kapitel die verschiedenen Grundlagendaten des Modells beschrieben.

2.1 Erosionsrisikokarte ERK2

Die Gewässeranschlusskarte ist eine Erweiterung der Erosionsrisikokarte ERK2, die im Auftrag des Bundesamtes für Landwirtschaft (BLW) erstellt wurde. Aus diesem Grund werden die meisten Annahmen bezüglich der zu berechnenden Fläche und der abflussbremsenden Landschaftselemente übernommen (Gisler et al. 2010; Gisler et al. 2011).

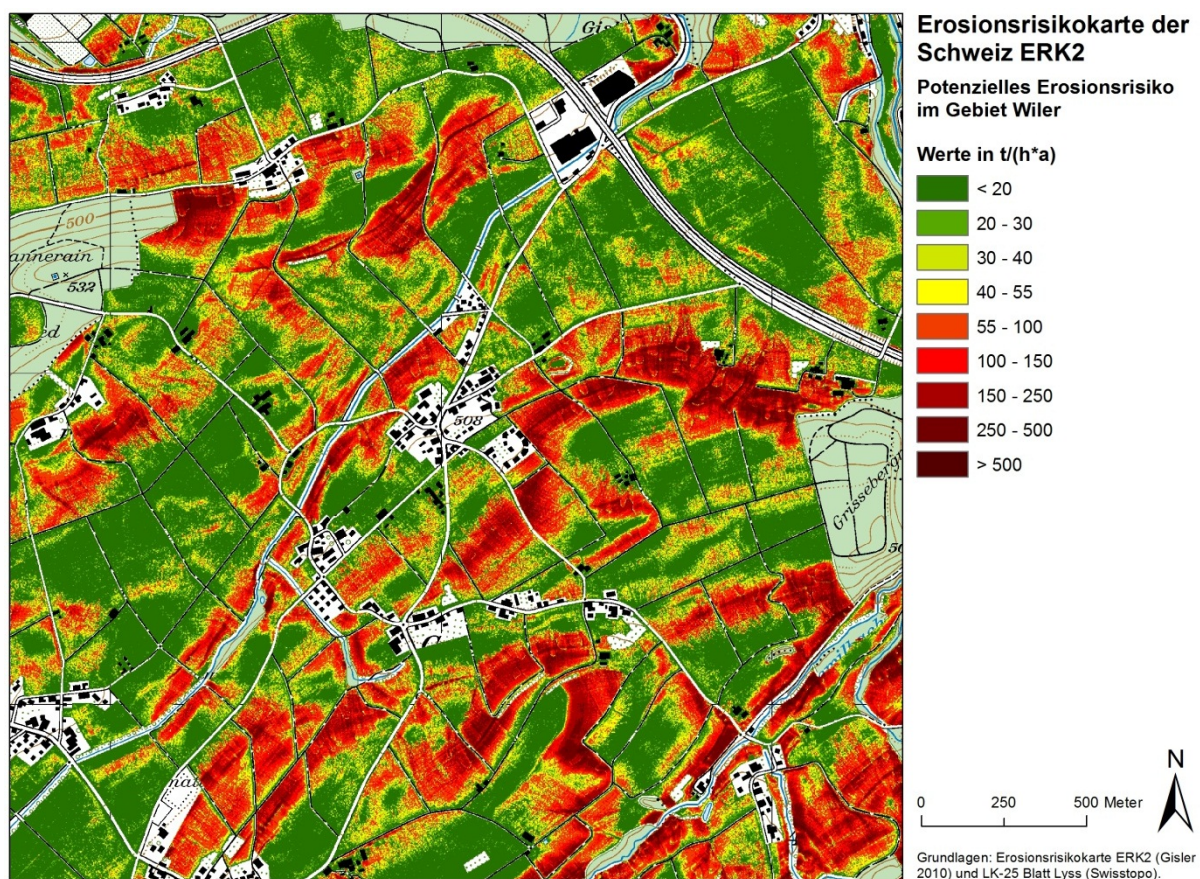


Abbildung 1: Erosionsrisikokarte der Schweiz ERK2 im Gebiet Wiler. (Quelle: Gisler et al. 2010, eigene Darstellung, hinterlegt mit der LK25 von Swisstopo).

Die Erosionsrisikokarte im 2x2 Meter-Raster (ERK2) zeigt das potenzielle Erosionsrisiko der landwirtschaftlichen Nutzfläche der Schweiz (Abbildung 1). Für die Berechnung wurde die frei verfügbare ArcView-Extension AV Erosion verwendet (Schäuble 2005), welche auf der MUSLE87 (Modified

Universal Soil Loss Equation von 1987, Hensel und Bork 1988) basiert. Mit der MUSLE87 kann der langjährige mittlere Bodenabtrag in Tonnen Bodenmaterial pro Hektar und Jahr durch die Multiplikation von 6 Faktoren berechnet werden. Diese sind: Niederschlagserosivität (R-Faktor), Bodenerodierbarkeit (K-Faktor), Grösse des Einzugsgebietes und Hanglänge (L-Faktor), Hangneigung (S-Faktor), Bodenbedeckung und -bearbeitung (C-Faktor) und Erosionsschutz (P-Faktor).

Da für die ganze Schweiz noch kein verfügbarer Datensatz, der die landwirtschaftlichen Flächen in Ackerland und Dauergrünland unterscheidet, besteht, wurde die Erosionsrisikokarte über die gesamte landwirtschaftliche Nutzfläche in der Tal- und Hügelizeone sowie in den Bergzonen 1 und 2 berechnet. Zudem wurde bei der Berechnung der ERK2 die Bodenbewirtschaftung und -bearbeitung (C-Faktor) ausgeklammert. Es wird also die Annahme getroffen, dass die für die ERK2 berechneten Flächen unbedecktes Ackerland sind, weshalb auch von einem potenziellen Erosionsrisiko gesprochen wird. Um aus dem potenziellen Risiko das aktuelle Bodenerosionsrisiko zu erhalten, müsste deshalb noch die aktuelle Landnutzung, Bodenbearbeitung und -bewirtschaftung der Flächen hinzugefügt werden.

2.2 Höhenmodell Swisalti3D

Für die Berechnung des S-, L- und P-Faktors der ERK2 wird das digitale Terrainmodell der amtlichen Vermessung (DTM-AV) verwendet. Es bildet im 2x2-Meter-Raster die Topographie ohne Bebauung und Vegetation ab. Aufgrund der guten Auflösung können mit dem DTM-AV auch Strukturen wie Geländekanten und Gräben erkannt werden, weshalb es sich besonders gut für hydrologische Abflussmodellierungen eignet. Während der Berechnung der ERK2 tauchten aber im Höhenmodell Probleme an Kachelgrenzen der 1:25'000 Kartenblätter von Swisstopo auf: Zum Teil sind benachbarte Rasterzellen nicht aufeinander abgestimmt, was zu Kanten und Löchern im Höhenmodell führt (siehe Abbildung 2). Dies wiederum führt zu Fehlern in der Fließakkumulationsrechnung, da dort virtuelle Gräben entstehen, die das Wasser sammeln. Zum Teil wurden diese Probleme im Rahmen der Berechnung der ERK2 behoben, an gewissen Orten sind sie aber durchaus in der Karte sichtbar.

Seit der Erstellung der Erosionsrisikokarte wurde das DTM-AV mehrmals überarbeitet und ist nun unter dem neuen Namen Swisalti3D als Teil des neuen Topographischen Landschaftsmodells der Schweiz erhältlich. Aus diesem Grund wird für die Berechnung des Gewässeranschlusses das neue Höhenmodell verwendet. Wie in Abbildung 2 sichtbar ist, konnten die für die ERK2 relevanten Fehler mittlerweile behoben werden. Da die Erosionsrisikokarte aber ins Modell integriert ist, können trotzdem Fehler im Endresultat auftauchen.

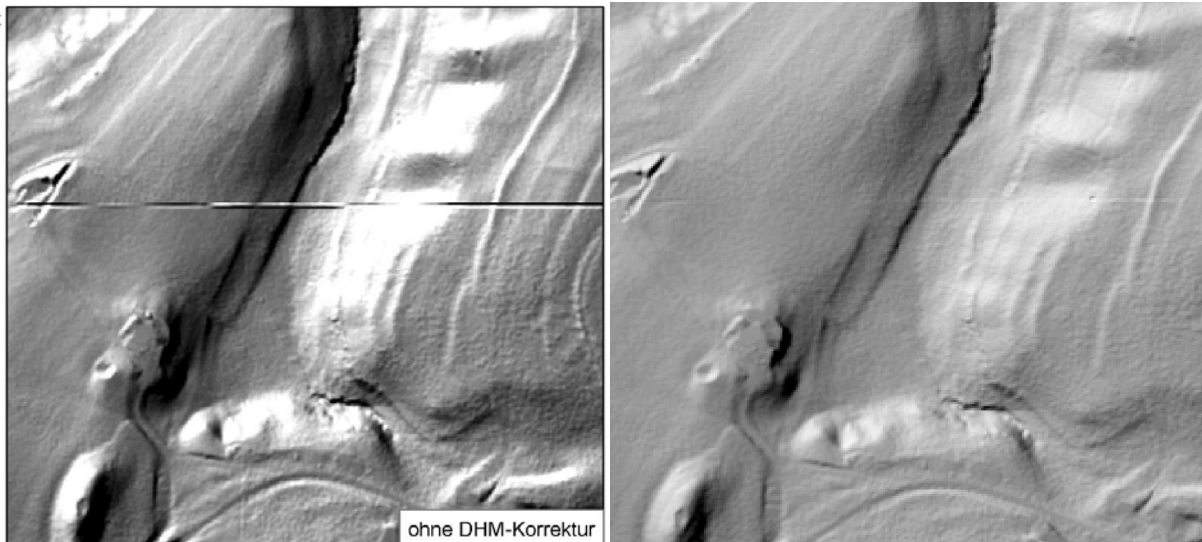


Abbildung 2: Hillshade der Kartenblattgrenze 1204/1224 (LK25) bei Le Châtelard. Die linke Abbildung zeigt das unbearbeitete 2m-Höhenmodell DTM-AV, bevor die Senke, die durch die sichtbaren Pixelfehler an der Kartenblattgrenze entstand, aufgefüllt wurde. Die rechte Abbildung zeigt das aktuelle 2m-Höhenmodell Swisalti3D. Der Fehler ist nur noch als schwacher Strich zu sehen und hat keine Auswirkung mehr auf Fließakkumulationsrechnungen. (Quelle: Gisler et al: 2010, eigene Darstellung).

Die Daten von Swisalti3D haben in der offenen Fläche eine Höhengenaugigkeit von ± 0.5 Metern und wurden mittels flugzeuggestütztem Laserscanning in den Jahren 2000-2007 erhoben. Sie decken die ganze Schweiz bis zu einer Höhe von 2000 Metern über Meer ab. Über dieser Höhe muss auf das Höhenmodell im 25-Meter-Raster ausgewichen werden (Swisstopo 2012a). Da der Gewässeranschluss nur für Gebiete bis zur Bergzone 2 berechnet wird, spielen Gebiete über 2000 m Meter keine Rolle.

2.3 Vector25

Für die Berechnung der landwirtschaftlichen Nutzfläche und des erweiterten Gewässernetzes werden Vector25-Daten verwendet (Swisstopo 2007). Vector25 ist das digitale Landschaftsmodell der Schweiz. Die Daten basieren inhaltlich und geometrisch auf der Landeskarte 1:25'000 von Swisstopo und bestehen aus neun thematischen Ebenen: Strassennetz, Eisenbahnnetz, übriger Verkehr, Gebäude, Gewässernetz, Hecken und Bäume, Primärflächen, Anlagen und Einzelobjekte.

Diese Ebenen bestehen aus Punkt-, Linien- oder Polygon-Shapefiles und beinhalten Attribute zur weiteren Unterteilung der Objekte. Die Primärflächen können so beispielsweise in 43 verschiedene Bodenbedeckungsarten wie Wald, See oder Siedlung unterteilt werden. Die Vector25-Daten wurden bis 2008 alle sechs Jahre angepasst, dies im gleichen Rhythmus wie die Landeskarte 1:25'000. Seit 2008 wird Vector25 aber nicht mehr erneuert und nach und nach vom neuen Topographischen Landschaftsmodell TLM abgelöst (Swisstopo 2012b). Im TLM beinhalten alle erhobenen Objekte Informationen über die dritte Dimension. Zudem werden die Daten nur noch anhand von Luftbildern und nicht mehr mit der Landeskarte erhoben. Das TLM beinhaltet alle Objekte von Vector25 sowie zu-

sätzliche, bisher nicht erhobene Daten und ist deshalb umfassender. Die Genauigkeit ist mit einem Meter besser als bei Vector25 mit 3-8 Metern (Swisstopo 2007; Swisstopo 2012b).

Vector25 wurde auch für die Erosionsrisikokarte verwendet, um den Feldblockplan, der die relevante Fläche definiert, zu berechnen. Dabei wurden aus der Primärflächenkategorie „z_übrige“ alle Strassen, Gewässer, Hecken, Gebäude, Einzelbäume und Eisenbahnen ausgeschnitten. Da die Erosionskarte auch ins Gewässeranschlussmodell einbezogen wird, werden im Modell deshalb die gleichen Annahmen getroffen. Dies betrifft im Besonderen die Pufferbreiten der ausgeschnittenen Linien-Shapefiles Gewässer, Strassen, Hecken und Eisenbahnen (siehe Anhang 2). Mit den Pufferstreifen wurde bei der Berechnung der ERK2 versucht, die normale Breite zuzüglich der gesetzlich vorgeschriebenen Pufferstreifen der Objekte wiederzugeben.

Für das Gewässeranschlussmodell sind die beiden Vector25-Layer „Gewässer“ und „Strassen“ wichtige Inputparameter:

Der Layer „Gewässer“ umfasst alle in der Landeskarte 1:25'000 erfassten oberirdischen Gewässer. Zusätzlich dazu beinhaltet es teilweise auch eingedolte Bäche, die in der Landeskarte nicht vermerkt sind. Häufig sind dies Teilstücke eines Baches, der oberhalb des eingedolten Teils auch an der Oberfläche fliesst. Kleinere Bäche, temporär wasserführende Gräben und der grösste Teil der eingedolten Bäche wurden aber in Vector25 nicht erfasst. Um aber das gesamte Gewässernetz bei der Modellierung berücksichtigen zu können, wird das Gewässernetz im Modell - soweit möglich - wieder um diese Elemente erweitert (siehe Kapitel 3.2.1). Zusätzlich werden aus der thematischen Ebene „Primärflächen“ von Vector25 Seen und Sumpfgebiete zum Gewässernetz dazugerechnet. Da eingedolte Bäche häufig in regelmässigen Abständen Kontrollschächte haben, bei denen das Oberflächenwasser in die Leitung fließen kann, werden diese auch zum Gewässernetz im Modell dazugerechnet (Doppeler et al. 2012).

Der Layer Strassen von Vector25 enthält 35 verschiedene Strassenattribute. Da im Modell das Gewässernetz um die entwässerten Strassen erweitert wird (siehe Kapitel 3.2.1), werden nur die Strassen verwendet, die möglicherweise entwässert sind und deren Entwässerung in den nächsten Vorfluter führt. Dies betrifft besonders die 1.-5.-Klass-Strassen und die Quartierstrassen. Da das Abwasser von Autobahnen und Autostrassen häufig noch gereinigt wird, werden diese nicht ins Modell integriert. In der Tabelle im Anhang 1 sind die verschiedenen verwendeten Strassenklassen und ihre Attribute sichtbar.

Im Topographischen Landschaftsmodell werden 1.-Klass-Strassen noch spezifischer aufgeteilt in 6m-Strassen und 10m-Strassen während die 4.- und 5.-Klass-Strassen in der neuen Kategorie 2m-Weg zusammengefasst werden. Das spielt für die zukünftige Verwendung des Gewässeranschlussmodelles

eine grosse Rolle, da 4.- und 5.-Klass Strassen vor allem landwirtschaftliche Güterwege sind und diese Unterscheidung für die Bestimmung von Strassenbelag und -entwässerung im Modell von zentraler Bedeutung ist. Es wäre sogar wünschenswert, wenn es eine noch genauere Unterteilung der 4.- und 5.-Klass-Strassen geben würde, denn je nach Bewirtschaftung können sie sehr verschieden aussehen (siehe Abbildung 3 und 4).



Abbildung 3: Vergleich von zwei 5.-Klass-Strassen im Gebiet Frienisberg. (Fotos: Simon Alder 12.1.2012).



Abbildung 4: Vergleich von zwei 4.-Klass-Strassen im Gebiet Frienisberg. (Fotos: Simon Alder 19.10.2011 und 12.1.2012).

3 Das Gewässeranschlussmodell

Das Gewässeranschlussmodell wurde in einer Masterarbeit am Geographischen Institut der Universität Bern entwickelt, kalibriert und plausibilisiert (Alder 2012). Es besteht aus mehreren Schritten, die in den Geoinformatikprogrammen ArcGIS 10 und SAGA-GIS 2.0.8 durchgeführt werden und vom Benutzer jeweils manuell ausgelöst werden müssen. Das Modell ist spezifisch auf die Schweiz und die Erosionsrisikokarte zugeschnitten und müsste für die Anwendung auf andere Gebiete angepasst werden.

Im folgenden Kapitel wird ein Überblick über das Modell gegeben. Eine detailliertere Erklärung zur Entwicklung des Modells ist in der Masterarbeit „Modellierung des Gewässeranschlusses potenziell erosionsgefährdeter Flächen im schweizerischen Mittelland“ (Alder 2012) zu finden.

3.1 Direkter und indirekter Gewässeranschluss

Das Gewässeranschlussmodell unterscheidet die landwirtschaftlich genutzte Fläche in drei Kategorien.

1. Nicht ans Gewässer angeschlossene Flächen. Von diesen Flächen gelangt normalerweise kein Erosionsmaterial ins Gewässer. Sie sind entweder eben oder zu flach oder der Oberflächenabfluss wird durch Hecken oder andere Landschaftselemente abgebremst.
2. Direkt ans Gewässer angeschlossene Flächen. Der Feldblock grenzt an ein Gewässer. Oberflächenabfluss kann flächenhaft oder konzentriert (Tiefenlinie) ins Gewässer erfolgen.
3. Indirekt ans Gewässer angeschlossene Flächen. Der Feldblock ist über Strassen und Güterwege mit Strassenentwässerung sowie Einlaufschächten oder Kontrollschächten am Gewässer angebunden und kann so durch abgeschwemmtes Bodenmaterial zur Gewässerverschmutzung beitragen. Oberflächenabfluss kann flächenhaft oder konzentriert (Tiefenlinie, Talweg) auf entsprechende Strassen bzw. in entsprechende Schächte gelangen.

Die Einlaufschächte, die einen grossen Anteil am indirekten Gewässeranschluss haben, lassen sich meistens in zwei verschiedene Formen einteilen: Schlammssammler und Kontrollschächte (Muth 1991):

- Schlammssammler beinhalten ein Setzbecken, wo sich das mitgeführte Material ablagern kann. Weiter oben im Schacht besteht ein Überlauf in eine Leitung, die das Wasser in den nächsten Vorfluter einleitet (Kuonen 1983). Schlammssammler müssen wegen den abgelagerten Sedimenten regelmässig geleert werden, damit das angesammelte Material nicht den Schacht verstopft oder doch noch in die Leitung gelangt. Es konnte jedoch nachgewiesen

werden, dass bei grossen Abflussereignissen das am Boden des Schlamm Sammlers abgelagerte Material aufgewirbelt wird und in die Leitung weiterfliessen kann (Jordi 2006).

- Kontrollschächte sind zur Überprüfung und Reinigung von Drainageleitungen bzw. eingedolten Bächen vorgesehen (Muth 1991). Meistens sind sie an der Oberfläche mit einem Deckel verschlossen, der häufig aber nicht vollständig wasserdicht ist und langsames Einsickern ermöglicht, zum Teil haben sie jedoch auch einen Gitterrost als Deckel. Einlaufendes Wasser wird direkt in die Abwasserleitung, die am Grund des Schachtes verläuft, eingeleitet.

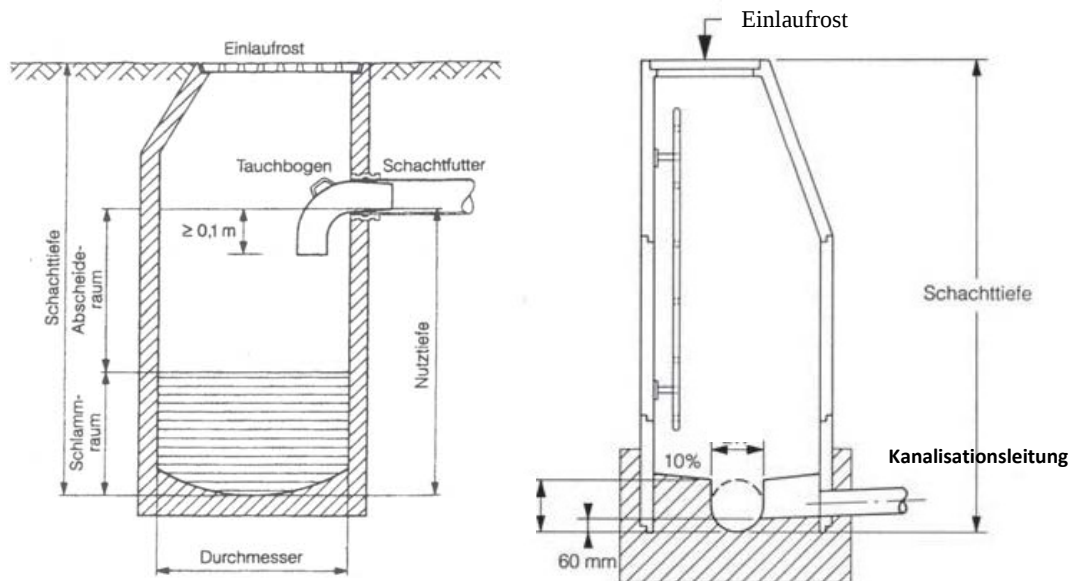


Abbildung 5: Querschnitte von Schlamm Sammler (links) und Kontrollschacht (rechts). (Quelle: <http://technikseiten.hsr.ch>, Zugriff: 17.12.2012, eigene Darstellung).

In der Schweiz existieren keine einheitlichen Vorschriften bei der Entwässerung von Strassen und Güterwegen. Je nach Art der Strasse sind Bund, Kanton oder Gemeinde zuständig. Digitale Unterlagen (z.B. Entwässerungskatasterpläne) über entwässerte Strassen und Güterwege liegen für die Schweiz nicht flächendeckend vor. Für weitere Details zur Strassenentwässerung siehe Alder (2012).

3.2 Ablauf der Berechnung

Das Gewässeranschlussmodell braucht als Eingangsdaten das Strassen- und Gewässernetz, ein Höhenmodell, um Tiefenlinien und Hangneigung zu berechnen, sowie das Erosionsrisiko der zu berechnenden Fläche. Im Verlauf des Modells werden, wie in Abbildung 6 zu sehen ist, vier Zwischenresultate berechnet. Diese sind die relevante landwirtschaftliche Fläche, das erweiterte Gewässernetz, abflussbremsende Flächen und die Fliessdistanzberechnung.

Das Resultat der Berechnung ist eine Rasterkarte in 3 Klassen zur direkten oder indirekten Anschlusswahrscheinlichkeit ans nächste Gewässer. Die einzelnen Schritte werden in den folgenden Unterkapiteln erläutert.

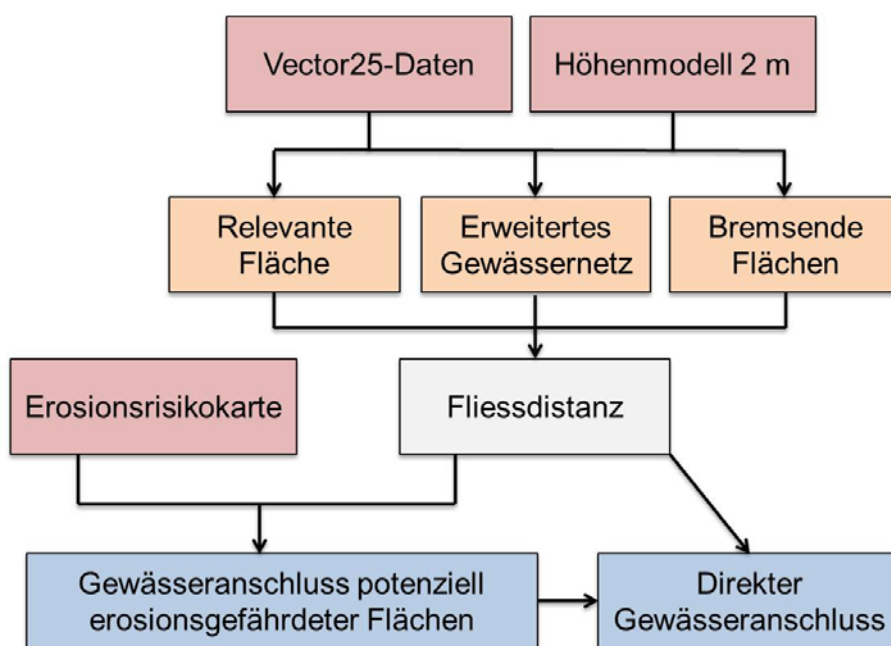
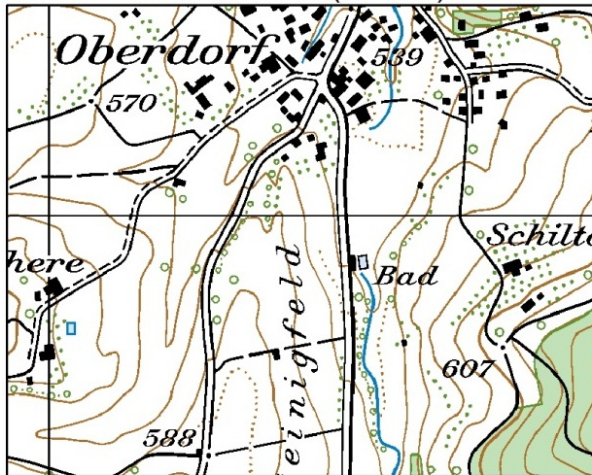


Abbildung 6: Ablauf der Gewässeranschlussmodellierung, rot sind die Eingangsdaten, weiss und braun die Zwischenresultate und blau die Endresultate. (Quelle: eigene Darstellung).

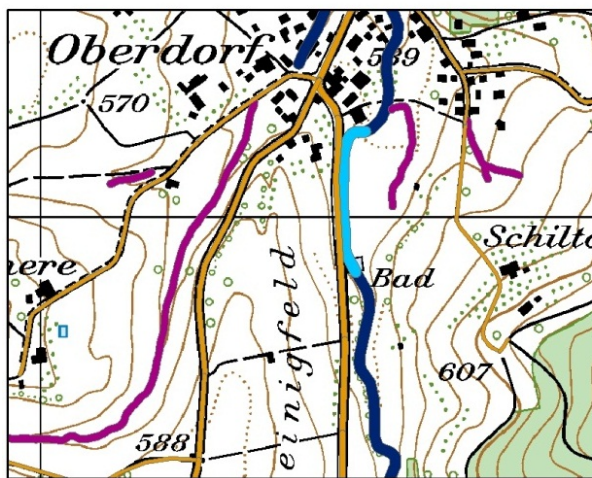
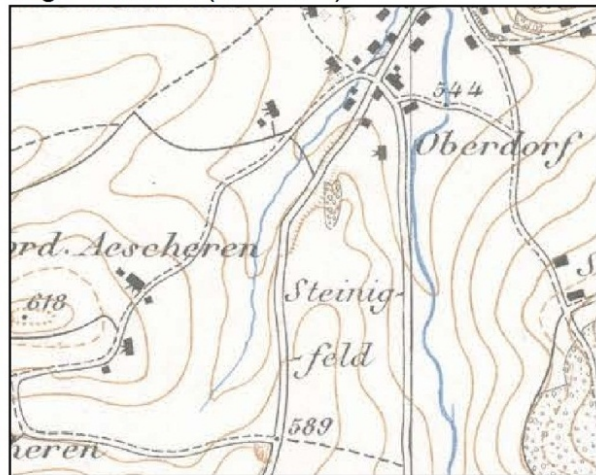
3.2.1 Berechnung des Erweiterten Gewässernetzes

Da das Gewässernetz von Vector25 nicht alle Oberflächengewässer und zeitweise wasserführenden Gräben umfasst, werden für das Modell Tiefenlinien berechnet, die als Ergänzung des Gewässernetzes in die Berechnung einfließen. Damit und anhand der Strassenklassen von Vector25 werden auch entwässerte Strassen ermittelt, welche mit dem Gewässernetz und den Tiefenlinien zusammen das erweiterte Gewässernetz ergeben. Für die Berechnung wird angenommen, dass alles Wasser, das in einer Tiefenlinie fließt oder auf eine entwässerte Strasse gelangt, auch ins nächste Gewässer gelangt.

Landeskarte 1:25'000 (aktuell)



Sigfriedkarte (ab 1870)



Erweitertes Gewässernetz

- Entwässerte Strassen
- Tiefenlinien
- Bach
- Eingedolter Bach

0 250 500 Meter



Abbildung 7: LK25, Sigfriedkarte und das erweiterte Gewässernetz in Melchnau. (Quelle: www.map.geo.admin.ch am 14.12.2012, eigene Darstellung).

Im Vergleich der Sigfriedkarte aus dem 19. Jahrhundert mit der aktuellen Landeskarte in Abbildung 7 wird sichtbar, dass ein Stück des Baches ab dem Bad eingedolt worden ist. Dieses Teilstück des Baches ist in Vector25 als „bach_u“ ausgewiesen und wird für das erweiterte Gewässernetz als Gewässer übernommen. Es wird angenommen, dass der Oberflächenabfluss von diesen Flächen sich höchstwahrscheinlich im alten Bachbett sammelt und über einen Einlaufschacht oder die Oberfläche wieder ins offene Gewässer gelangt.

Der zweite in der Sigfriedkarte sichtbare Bach, westlich des Steinigfeldes, wurde ganz eingedolt und wird ins erweiterte Gewässernetz als abflussführende Tiefenlinie integriert. Diese Tiefenlinien werden folgendermassen berechnet:

Mit dem Höhenmodell wird die Konvergenz innerhalb der einzelnen Feldblöcke der landwirtschaftlichen Nutzfläche berechnet. Damit werden Rasterzellen, in denen der Oberflächenabfluss von

$\geq 5'000\text{m}^2$ landwirtschaftlicher Nutzfläche konvergiert, ermittelt. Aus diesen Rasterzellen werden danach Tiefenlinien erstellt. Für jedes Gebiet werden zwei verschiedene Tiefenlinien berechnet:

- Um zu erkennen, ob eine 4.- oder 5.-Klass-Strasse wahrscheinlich entwässert ist oder ein eingedolter Bach durch eine Fläche fliesst, werden für die erste Tiefenlinienberechnung 4.- und 5.-Klass-Strassen (landwirtschaftliche Güterwege) nicht aus der zu berechnenden Fläche ausgeschnitten, damit das virtuelle Wasser in der Fliessakkumulationsberechnung über diese Strassen ins nächste Feld „fliessen“ kann. Dadurch können ausgeprägte Tiefenlinien und Talformen, die sich über mehrere Feldblöcke erstrecken, erkannt werden.
- Für die Berechnung der Tiefenlinien, die dann tatsächlich als erweitertes Gewässernetz verwendet werden, wird die Konvergenz für jeden einzelnen Feldblock berechnet. Es wird davon ausgegangen, dass das Wasser am Rande eines Feldblockes abgeleitet wird und nicht in einen nächsten Feldblock fließen kann. Davon werden folgende Tiefenlinien nicht weiter berücksichtigt:
 - Tiefenlinien, die nicht ins Gewässer oder Strassennetz fließen, sondern z.B. in den Wald.
 - Tiefenlinien, die über eine 4.- oder 5.-Klass-Strasse in einen Wald fließen.
 - Tiefenlinien, die selbst eine sehr schwache durchschnittliche Neigung ($< 2\%$) haben, die durch einen Feldblock mit einer schwachen durchschnittlichen Neigung ($< 3.7\%$) oder mehr als zur Hälfte durch ein sehr flaches Gebiet ($\leq 1\%$ Neigung) fließen.

Die restlichen Tiefenlinien werden im Modell weiterverwendet und auf beiden Seiten mit sechs Metern gepuffert, damit sie genügend breit sind, um in der Fliessakkumulationsberechnung eine Rolle zu spielen und in der Karte besser erkannt werden können.

Da der Strassenlayer in Vector25 keine Information beinhaltet, ob eine Strasse bzw. ein Güterweg entwässert ist, werden im Modell anhand der Strassenklassen, also des Ausbaustandards der Strassen, folgende Annahmen getroffen:

- Für Autobahnen und Autostrassen wird angenommen, dass für sie wegen dem hohen Verkehrsaufkommen und den dadurch abgelagerten Substanzen wie Blei, Cadmium und Zink (BUWAL 1996) eine eigene Kanalisation besteht, die das Abwasser in eine Reinigungsanlage einleitet. Sie gelten somit als nicht ans Gewässer angeschlossen.
- Für Quartierstrassen und 1.-3.-Klass-Strassen wird angenommen, dass sie über Einlaufschächte entwässert sind. Dies hängt mit der grossen versiegelten Strassenfläche zusammen, auf der viel Wasser anfällt, das zu Schäden führen kann, wenn es nicht abgeleitet wird (Noll 2009).

- 4.-Klass-Strassen werden in drei verschiedene Kategorien eingeteilt:
 - 4.-Klass-Strassen, die eine starke Neigung haben (mittlere Neigung $> 6\%$ und minimale Neigung $> 0.5\%$) sind aufgrund der zu erwartenden hohen Geschwindigkeit des Abflusses erosionsgefährdet und deshalb entwässert.
 - 4.-Klass-Strassen, auf denen an einer oder mehreren Stellen konzentrierter Oberflächenabfluss vom benachbarten Feld auftritt - in die also eine berechnete Tiefenlinie fliesst - sind zumindest an dieser Stelle oder auf der ganzen Länge entwässert.
 - 4.-Klass-Strassen, die entlang dem Waldrand führen und alle anderen 4.-Klass-Strassen, die nicht unter die beiden oben genannten Punkte fallen, sind nicht entwässert und werden als Bremsen ausgeschnitten.
- 5.-Klass-Strassen werden in zwei verschiedene Kategorien eingeteilt:
 - 5.-Klass-Strassen, auf denen an einer oder mehreren Stellen konzentrierter Oberflächenabfluss aus einer berechneten Tiefenlinie vom benachbarten Feld auftritt, sind an diesen Stellen entwässert. Die restliche 5.-Klass-Strasse hat aber wahrscheinlich keine Einlaufschächte, sondern ist nur abflussleitend. Deshalb werden diese Strassen um einen Meter ins Höhenmodell eingeschnitten, damit sie als Leitlinie wirken können, der Abfluss aber trotzdem wieder ins Feld fließen könnte (Kipfer et al. 2009).
 - 5.-Klass-Strassen, die nicht an einer berechneten Tiefenlinie liegen, werden als Bremsen ausgeschnitten.

Die ermittelten entwässerten Strassen werden je nach Strassentyp und -breite gepuffert und mit den berechneten Tiefenlinien und den Oberflächengewässern zum erweiterten Gewässernetz zusammengefügt (siehe Abbildung 8).

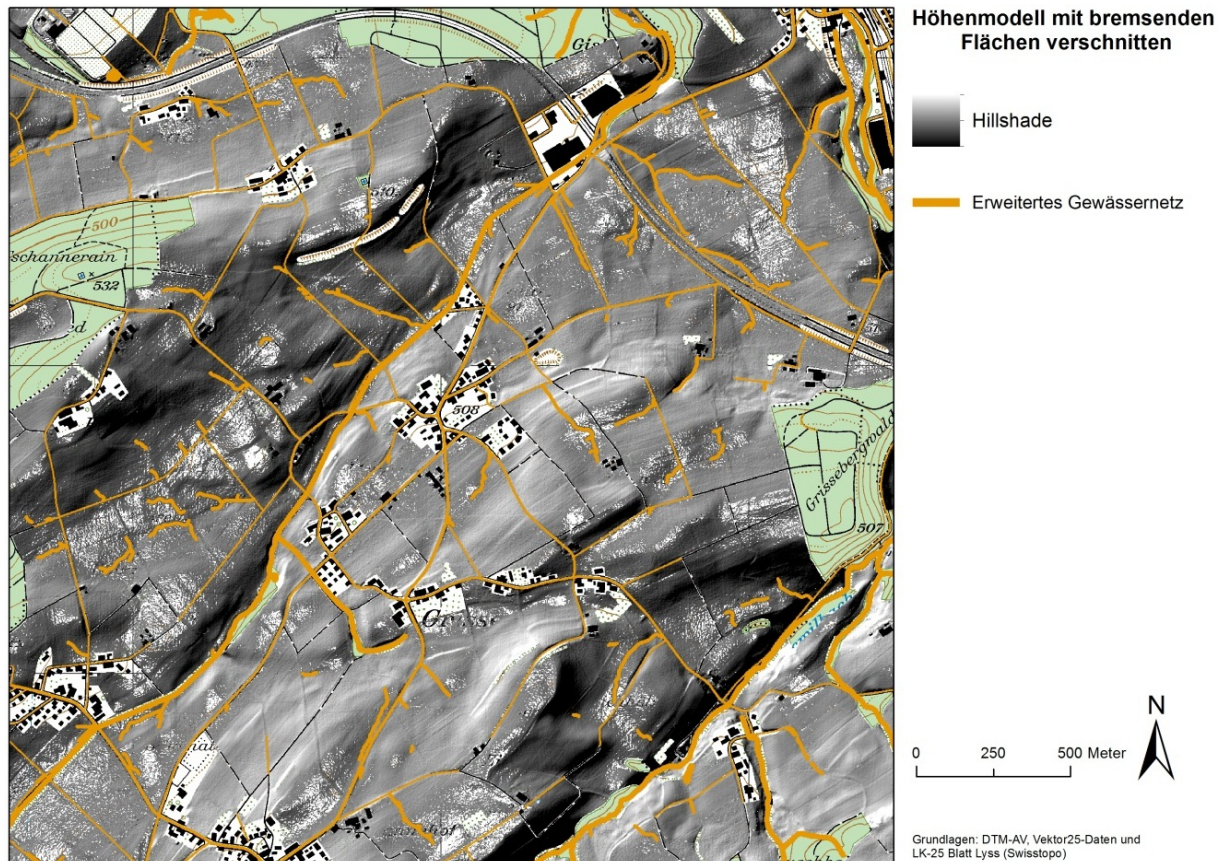


Abbildung 8: Höhenmodell mit ausgeschnittenen bremsenden Flächen und dem erweiterten Gewässernetz. Die bremsenden Flächen sind überall da, wo die Landeskarte hinter dem Hillshade des Höhenmodells sichtbar wird (Quelle: eigene Darstellung, hinterlegt mit der LK25 von Swisstopo).

3.2.2 Abflussbremsende Elemente

Alle Strassen bzw. Güterwege, die nicht ins erweiterte Gewässernetz integriert oder als abflussleitend ins Höhenmodell eingetieft werden, gelten als abflussbremsend und werden aus dem zu berechnenden Gebiet ausgeschnitten. Weitere abflussbremsende und deshalb auszuschneidende Elemente sind folgende:

- Für den Wald wird angenommen, dass kein Abfluss vom Wald ins Feld oder auf Strassen gelangen kann. Oberflächenabfluss, der vom Feld in den Wald gelangt wird meistens so stark gebremst, dass mitgeführtes Erosionsmaterial abgelagert wird.
- Das Siedlungsgebiet wird ausgeschnitten, weil Oberflächenabflusswasser aus Siedlungsgebiet stärker belastet ist als solches aus Landwirtschaftsgebiet und es deshalb einer Kläranlage zugeführt oder zum Versickern gebracht wird (Jordi 2006).
- Durch Hecken fließender Oberflächenabfluss wird ähnlich wie im Wald stark abgebremst, womit sich das Erosionsmaterial abgelagert (Noll 2009).
- Flächen mit einer Hangneigung von weniger als 2% tragen nicht zum Oberflächenabfluss bei, es sei denn, sie liegen in einer Mulde, durch die eine berechnete Tiefenlinie führt (Halbfass 2005).

- Böschungen sind meistens bewachsen und beinhalten häufig auch eine Hecke, was beides abflussbremsend wirkt. Für die Erosionsrisikokarte wurden nur Böschungen in der unmittelbaren Nähe zum Gewässer ausgeschnitten.

3.2.3 Fliessakkumulationsberechnungen

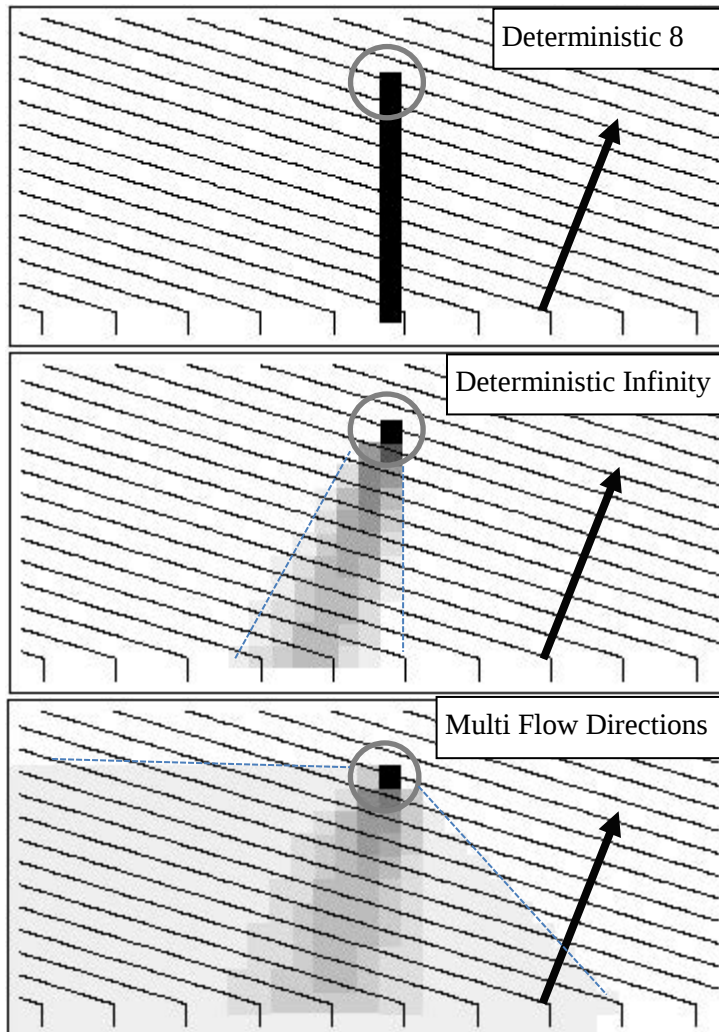


Abbildung 9: Einzugsgebiet der umkreisten Rasterzelle eines Höhenmodells mit den Fliessakkumulationsalgorithmen D8, DINF und MFD. Die Pfeile zeigen die Hangneigung und die Fließrichtung an, die Linien sind die Höhenkurven, der Hang ist gleichmässig geformt. Sichtbar ist die unterschiedliche Ausdehnung des Einzugsgebietes der Zelle mit den verschiedenen Algorithmen, die beim DINF und MFD-Algorithmus mit einer blau gestrichelten Linie hervorgehoben wird. (Quelle: Tarboton 1997, Alder 2012).

Die verschiedenen Fliessakkumulationsberechnungen des Gewässeranschlussmodells werden alle im SAGA-GIS gemacht, da dort verschiedene Algorithmen verwendet werden können, während es im ArcGIS nur eine Möglichkeit gibt (Deterministic 8, Cimmery 2010). Drei verschiedene Algorithmen sind in Abbildung 9 sichtbar. Der Deterministic 8-Algorithmus beschreibt den Abfluss bei dem schräg zur Hangneigung liegenden Raster sehr ungenau. Die beiden anderen Algorithmen geben ein genaueres Abbild der Realität. Der Deterministic Infinity-Algorithmus hat eine etwas stärkere Konvergenz als der Multi Flow Directions-Algorithmus, da beim Multi Flow jede Zelle, die auch nur einen Bruch-

teil zum Abfluss beitragen könnte, zum Einzugsgebiet dazugezählt wird (Freeman 1991). Beim Deterministic Infinity-Algorithmus werden nur die Zellen berücksichtigt, die einen gewichtigen Anteil am zum Abfluss beitragen (Tarboton 1997).

Aus diesen Gründen werden im Gewässeranschlussmodell die Tiefenlinien mit dem Deterministic Infinity-Algorithmus berechnet. Vor dieser Berechnung müssen allerdings abflusslose Senken aus dem Höhenmodell entfernt werden, damit das virtuelle Wasser im Modell aus jedem Feldblock hinausfließen kann (Schäuble 2005). Für die Fließdistanz zum erweiterten Gewässernetz, wo möglichst das ganze Einzugsgebiet modelliert werden soll, wird dagegen der Multi Flow-Algorithmus verwendet.

3.2.4 Fließdistanzberechnung

Bei den meisten Fließakkumulationsberechnungen ist keine Integration von abflussbremsenden Elementen möglich, da nur berechnet wird, von wie vielen Zellen das virtuelle Wasser zuerst zusammen und dann aus dem Feldblock heraus fließt. Bei der Fließdistanzberechnung kann das virtuelle Wasser nur ins „Channelnet“ (= erweitertes Gewässernetz) hineinfließen. Alle Zellen, von denen der Abfluss aus dem Feldblock hinaus und nicht ins erweiterte Gewässernetz fließt, werden ausgeschieden. Deshalb werden die abflussbremsenden Elemente und Flächen zuerst aus dem Feldblockraster ausgeschnitten, damit die Zellen, die nur dort hinein entwässern, gelöscht werden. Danach wird über die resultierende Fläche das Höhenmodell gelegt (siehe Abbildung 8).

Von jeder Rasterzelle des Höhenmodells wird in der „Overland Flow Distance to Channelnet“-Rechnung in SAGA-GIS die Oberflächenfließdistanz zum erweiterten Gewässernetz berechnet. Diese beinhaltet die vertikale und die horizontale Fließdistanz. Um die direkt am Gewässer angeschlossenen Flächen zu ermitteln, wird das erweiterte Gewässernetz in der zweiten Fließdistanzberechnung auf die Gewässer und die Tiefenlinien, die ins Gewässer fließen, verkleinert. Für diese Berechnung des direkten Anschlusses werden alle Strassen und Güterwege als Bremsen aus dem Höhenmodell ausgeschnitten (siehe Abbildung 10).

3.2.5 Verschneidung der Fließdistanz mit der Erosionsrisikokarte

Im letzten Schritt des Modells wird die Fließdistanz mit dem Erosionsrisiko verrechnet, damit gezeigt werden kann, wie weit erosionsgefährdete Rasterzellen vom erweiterten Gewässernetz entfernt liegen. Um dies zu erreichen, wird die Fließdistanzkarte wie die Erosionsrisikokarte in 9 Klassen eingeteilt. Die Fließlänge der einzelnen Klassen nimmt dabei mit der wachsenden Entfernung zu: Je näher eine Zelle am erweiterten Gewässernetz liegt, desto grösser ist die Wahrscheinlichkeit einer Anbindung. Für die ERK2 wird die bereits bestehende Klassierung in neun Gefährdungsklassen übernommen:

Fliessdistanz in Meter	Fliessdistanz klassiert	ERK2 in t/(ha*a)	ERK2 klas- siert	Gewichtung der ERK2 klassiert
0 – 10	9	> 500	9	0.6Flie ssd. + 0.4ERK2
10 – 30	8	250 – 500	8	0.6Flie ssd. + 0.4ERK2
30 – 60	7	150 – 250	7	0.6Flie ssd. + 0.4ERK2
60 – 100	6	100 – 150	6	0.7Flie ssd. + 0.3ERK2
100 – 170	5	55 – 100	5	0.7Flie ssd. + 0.3ERK2
170 – 270	4	40 – 55	4	0.7Flie ssd. + 0.3ERK2
270 – 420	3	30 – 40	3	0.8Flie ssd. + 0.2ERK2
420 – 650	2	20 – 30	2	0.8Flie ssd. + 0.2ERK2
> 650	1	< 20	1	0.8Flie ssd. + 0.2ERK2

Tabelle 1: Klassierungen der Fliessdistanz und der ERK2. (Quelle: Alder 2012).

Zusätzlich dazu wird in der Berechnung das Erosionsrisiko mit zunehmender Fliessdistanz vom erweiterten Gewässernetz weg weniger stark gewichtet, damit die Erosionsgefährdung weit vom Gewässer entfernter Zellen nicht gleich stark in die Modellierung einfließt wie beispielsweise diejenige von direkt in einer Tiefenlinie gelegenen Zellen (siehe Tabelle 3).

Diese neun Klassen des gewichteten Ergebnisses werden im Modell weiter vereinfacht, damit besser ersichtlich wird, auf welchen Flächen eine hohe Anschlusswahrscheinlichkeit besteht. Die Anschlusswahrscheinlichkeit ist dabei keine streng mathematische, auf Wahrscheinlichkeitsberechnungen beruhende Einteilung, sondern eine geschätzte, auf Annahmen und Expertenwissen beruhende Einteilung.

Die mittleren Klassierungen, denen wegen der Berechnungsart am meisten Zellen zugeteilt werden, werden nur auf zwei Werte beschränkt, während die hohe und die niedrige Klassierung mehr Werte zugewiesen erhalten:

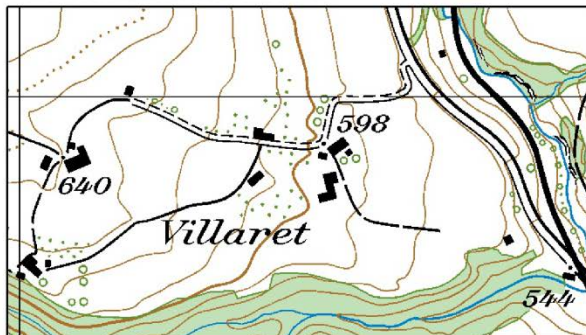
9 Klassen	3 Klassen	Anschlusswahrscheinlichkeit
1 – 4	1	Niedrig
> 4 – 6	2	Mittel
> 6 – 9	3	Hoch

Tabelle 2: Umrechnung der Gewässeranschlusskarte von 9 in 3 Klassen. (Quelle: Alder 2012, eigene Darstellung).

Um die Karte zur Unterscheidung des direkten und indirekten Gewässeranschlusses zu erstellen, wird für die Fliessdistanz des direkten Gewässeranschlusses dasselbe Vorgehen gewählt wie für den gesamten Gewässeranschluss. Dazu werden die Strassen und Güterwege aber als Bremsen ausgeschnitten. Danach wird die direkte Gewässeranschlussrechnung über die gesamte Gewässeranschlussrechnung gelegt. Weil die Multi-Flow-Berechnung das Einzugsgebiet einer Zelle stark überschätzt (siehe Abbildung 9), erhalten die direkt angeschlossenen Flächen bei dieser Berechnung eine grössere Aus-

dehnung als sie bei der Berechnung des gesamten Gewässeranschlusses haben. In Abbildung 10 ist sichtbar, dass bei der Berechnung des direkten Gewässeranschlusses auch viele Zellen berücksichtigt werden, von welchen der Abfluss in der Fliessdistanzrechnung zum erweiterten Gewässernetz noch in eine Strasse geflossen wäre (roter Kreis). Es wird die unrealistische Annahme gemacht, dass der Oberflächenabfluss von diesem Feldblock um das Waldstück herumfließt und im Gewässer landen könnte (gelber Kreis). Dies geschieht vor allem in grossen Feldblöcken, von denen ein kleiner Teil einen realistischen direkten Gewässeranschluss hat. Durch die Neuberechnung der Fliessdistanz zum Gewässernetz wird dieses kleine Gebiet, das am Gewässer angeschlossen ist, stark überschätzt.

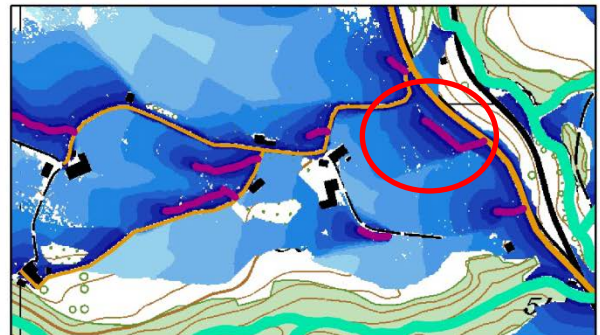
Kartenausschnitt Villaret



Fliessdistanz klassiert (in Meter)



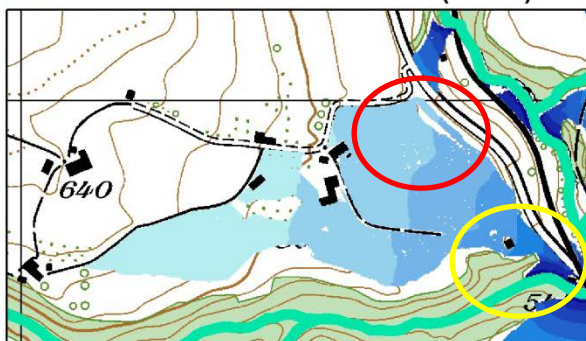
Fliessdistanz zum erweiterten Gewässernetz



Erweitertes Gewässernetz



Fliessdistanz zum Gewässernetz (direkt)



Fliessdistanz direkt/gesamt kombiniert

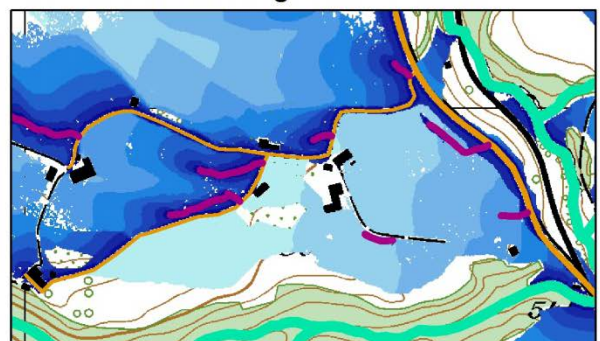


Abbildung 10: Gegenüberstellung der Fliessdistanzrechnung zum erweiterten Gewässernetz (oben rechts) und zum normalen Gewässernetz (unten links) für die Berechnung des gesamten Gewässeranschlusses bzw. des direkten Gewässeranschlusses. Für die Unterscheidung von direkt und indirektem Gewässeranschluss wird der direkte Anschluss über die gesamte angeschlossene Fläche gelegt (unten rechts). (Quelle: eigene Darstellung, hinterlegt mit der LK25 von Swisstopo).

In Tabelle 3 ist ersichtlich, wie gross das Erosionsrisiko sein muss, damit die jeweiligen Anschlusswahrscheinlichkeiten erreicht werden. Für die verschiedenen Anschlusswahrscheinlichkeiten können damit folgende Aussagen gemacht werden: Bei einer Fliessdistanz von 0-100 Meter zum erweiterten Gewässernetz ist die Anschlusswahrscheinlichkeit immer entweder gross oder mittel. Ab 170 Metern Fliessdistanz zum erweiterten Gewässernetz kann die Anschlusswahrscheinlichkeit nur noch mittel oder niedrig sein und ab 420 Metern Fliessdistanz ist die Anschlusswahrscheinlichkeit immer niedrig.

Bei grossen Feldblöcken und langen Fliessdistanzen spielen jedoch die modellierten Tiefenlinien eine grosse Rolle, weil sie die Fliessdistanz zum erweiterten Gewässernetz verkürzen können.

Fliessdistanz in Meter	Anschlusswahrscheinlichkeit gross	Anschlusswahrscheinlichkeit mittel	Anschlusswahrscheinlichkeit niedrig
0 – 10	ERK2 ≥ 20 t/(ha*a)	ERK2 < 20 t/(ha*a)	-
10 – 30	ERK2 > 40 t/(ha*a)	ERK2 ≤ 40 t/(ha*a)	-
30 – 60	ERK2 > 55 t/(ha*a)	ERK2 ≤ 55 t/(ha*a)	-
60 – 100	ERK2 > 100 t/(ha*a)	ERK2 ≤ 100 t/(ha*a)	-
100 – 170	ERK2 > 500 t/(ha*a)	ERK2 ≤ 500 t/(ha*a) und ≥ 20 t/(ha*a)	ERK2 < 20 t/(ha*a)
170 – 270	-	ERK2 > 55 t/(ha*a)	ERK2 ≤ 55 t/(ha*a)
270 – 420	-	ERK2 > 500 t/(ha*a)	ERK2 ≤ 500 t/(ha*a)
420 – 650	-	-	Immer niedrig
> 650	-	-	Immer niedrig

Tabelle 3: Das verwendete Erosionsrisiko in den neun Fliessdistanzklassen, damit die jeweilige Anschlusswahrscheinlichkeit erreicht wird. (Quelle: eigene Darstellung).

3.3 Plausibilisierung des Modells

Die Kalibrierung und Plausibilisierung des Gewässeranschlussmodells erfolgte in sechs verschiedenen Gebieten in der Schweiz (Alder 2012). Um die potenzielle Gefährdung annähernd zu bewerten, braucht es möglichst lange Datenreihen, da die Fruchtfolgeflächen eines Gebiets nie alle gleichzeitig unbedeckt sind. Genau davon gehen aber das Gewässeranschlussmodell sowie die ERK2 aus. Mehrjährige Datenreihen mit Feldkartierungen zum Gewässeranschluss von Ackerflächen gibt es für die Schweiz nur in der Region Frienisberg. In wenigen Gebieten (Ossingen, Avenches) konnte das Modell anhand Felddaten aus einer kürzeren Zeitspanne plausibilisiert werden. Bei der Plausibilisierung der Karte in diesen Gebieten zeigte sich, dass der potenzielle Gewässeranschluss die angeschlossene Fläche im Vergleich mit dem aktuellen Gewässeranschluss der Felddaten überschätzt.

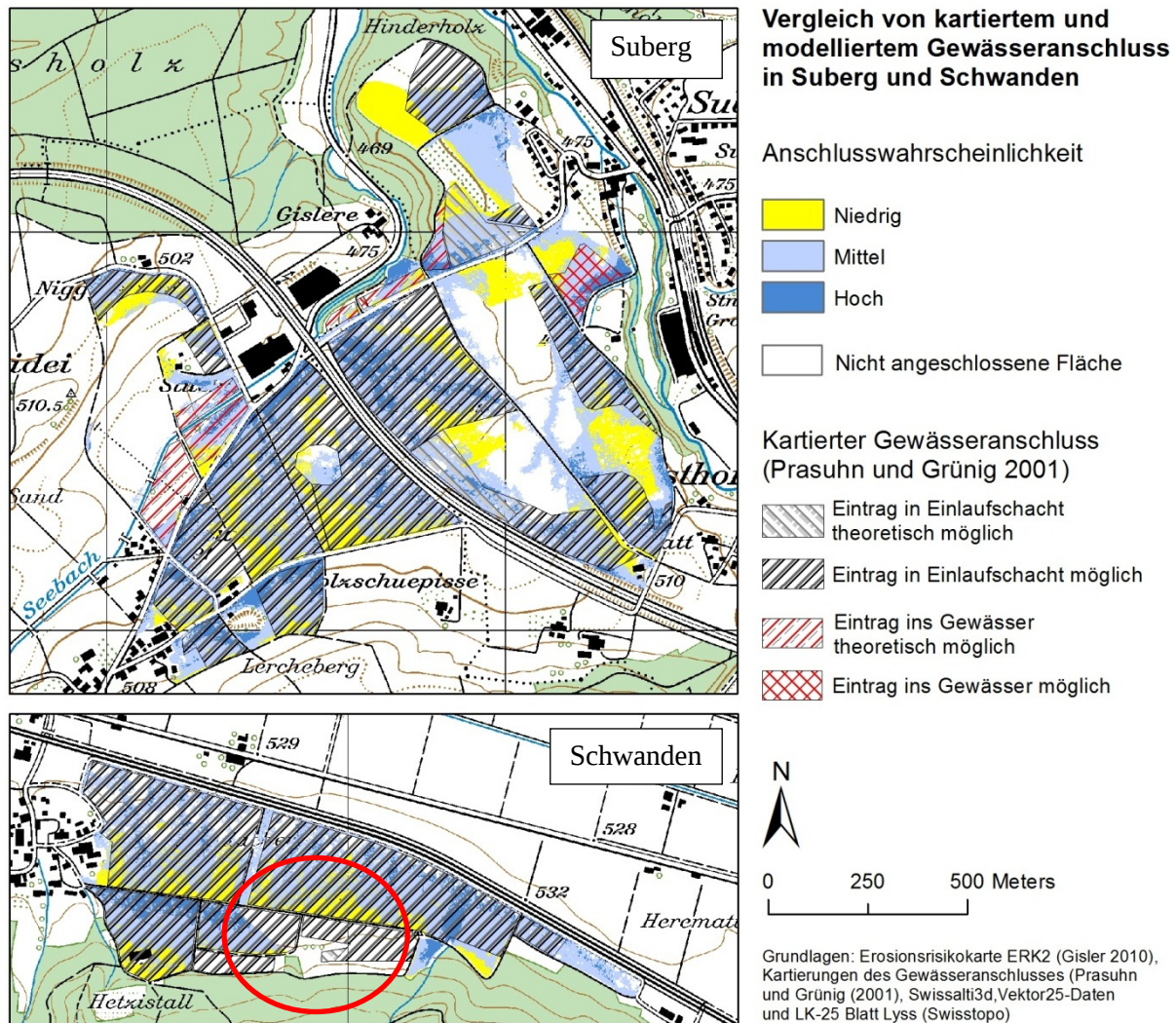


Abbildung 11: Modellierter (blau und gelb) und kartierter (schraffiert) Gewässeranschluss in den Gebieten Suberg und Schwanden. Einkreist sind im Text erwähnte Flächen. (Quelle: Prasuhn und Grünig 2001, eigene Darstellung, hinterlegt mit der LK25 von Swisstopo).

In Abbildung 11 ist sichtbar, dass mit Ausnahme von zwei Flächen in Schwanden für sämtliche kartierten Flächen auch ein Gewässeranschluss modelliert wurde. Die beiden nicht berechneten Flächen (roter Kreis) haben eine kurze Hanglänge und zu wenig Konvergenz, als dass die untenliegenden Strassen im Modell als entwässert ausgeschieden würden (siehe Kapitel 3.2.1). In beiden Gebieten wird die ans Gewässer angeschlossene Fläche überschätzt wie auch unterschätzt. Die Überschätzung kommt daher, dass der Gewässeranschluss für die gesamte landwirtschaftliche Nutzfläche berechnet wird, während die Kartierungen von Prasuhn und Grünig (2001) nur für das reine Ackerland gemacht wurden. Die Unterschätzung der ans Gewässer angeschlossenen Fläche gibt es, weil beispielsweise Flächen, die eine zu geringe Hangneigung haben, nicht mitberechnet werden.

Ähnliche Kartierungen wurden in Ossingen von Doppler et al. (2012) gemacht (siehe Abbildung 12). Im Vergleich mit der Gewässeranschlusskarte fallen die gleichen Unterschiede wie in Suberg und Schwanden auf. Einerseits überschätzt das Modell die ans Gewässer angeschlossene Fläche, andererseits unterschätzt es sie auch an gewissen Stellen (schwarz eingekreist). Der Grund dafür liegt in den

Modellannahmen des Gewässeranschlussmodells, wonach der Wald nicht zum Abfluss beitragen kann und nicht entwässerte 4.- und 5.-Klass-Strassen den Oberflächenabfluss bremsen.

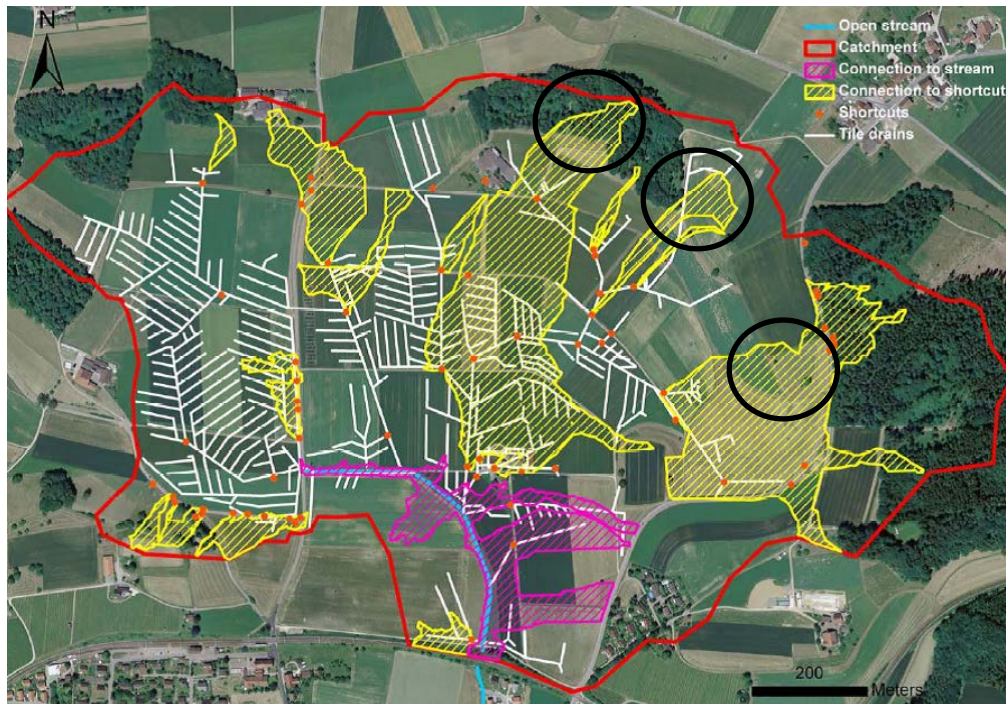


Abbildung 12: Kartierter direkter und indirekter Gewässeranschluss und Drainageleitungen in Ossingen. Eingekreist sind im Text erwähnte Flächen. (Quelle: Doppler et al. 2012).

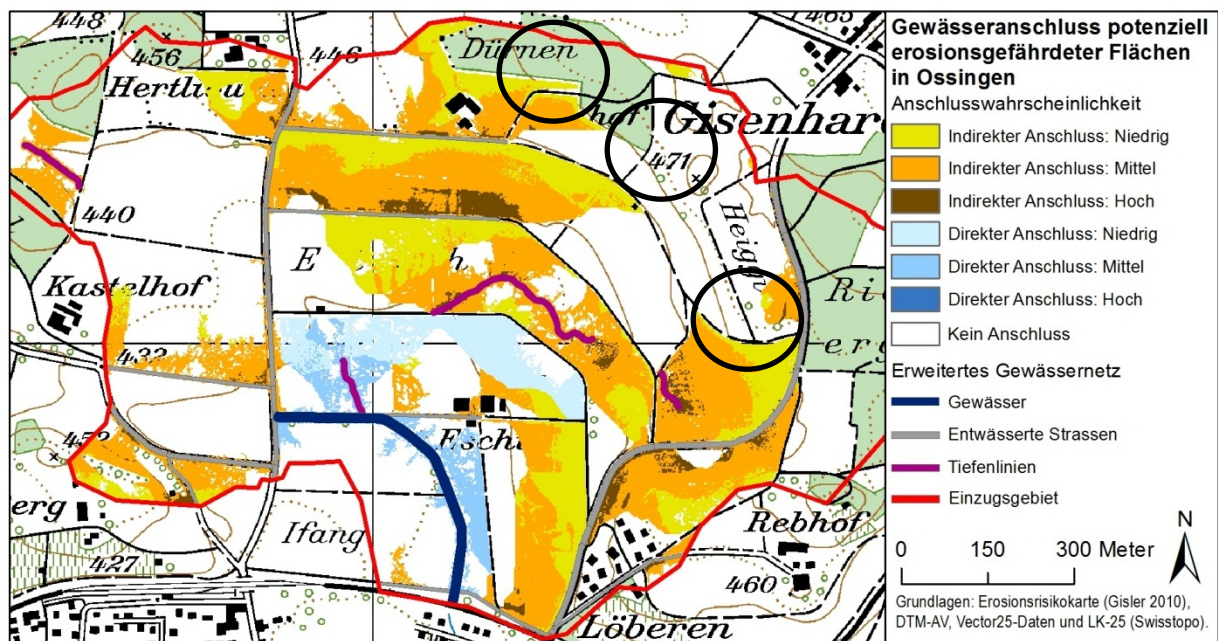


Abbildung 13: Direkter und indirekter Gewässeranschluss potenziell erosionsgefährdeter Gebiete. Eingekreist sind im Text erwähnte Stellen. (Quelle: eigene Darstellung, hinterlegt mit der LK25 von Swisstopo).

Zusätzlich zu dieser Plausibilisierung des Modells mit Flächendaten zum Gewässeranschluss wurde auch das erweiterte Gewässernetz als wichtiges Zwischenresultat bewertet. Dabei wurde überprüft, ob die erfassten entwässerten Strassen und Güterwege auch tatsächlich Einlaufschächte haben und das

Oberflächenwasser in Schächte und Leitungen fließen kann. Für 84% aller 1.-5.-Klass-Strassen in vier verschiedenen Gebieten wurde die Entwässerung im Modell richtig ermittelt. Werden nur die 4.- und 5.-Klass-Strassen betrachtet liegt der Wert bei 81% (Details siehe Alder 2012).

4 Resultate und Analysen

Aus dem Ergebnis des Gewässeranschlussmodells resultieren zwei verschiedene Karten. Die eine, die Gewässeranschlusskarte ohne Unterscheidung des direkten und indirekten Anschlusses, hat drei Klassen für die Anschlusswahrscheinlichkeit ans Gewässer. Die andere, die direkte/indirekte Gewässeranschlusskarte, besteht aus sechs Klassen und unterscheidet zwischen direktem und indirektem Gewässeranschluss. Beide Karten wurden für die Tal- und Hügelizezone sowie die Bergzone 1 und 2 berechnet (siehe Abbildung 14). In Tabelle 4 ist ersichtlich, dass die Bergzonen jedoch nur einen geringen Anteil am gesamtschweizerischen Ackerland haben. Da in der Gewässeranschlusskarte zwar auch Dauerwiesen und -weiden mitberechnet wurden, die Modellierung dort aber wegen der ständigen Bodenbedeckung nicht relevant ist, sind die wichtigsten berechneten Gebiete jene, die viel Ackerfläche beinhalten. Aus diesem Grund werden alle Resultate des Modells – analog zur ERK2 – primär für die Tal- und Hügelizezone bereitgestellt und als Ergänzung auch noch für die Bergzonen 1 und 2. In der Tal- und Hügelizezone sind 62% der berechneten Fläche Ackerland und Reben, 38% sind Dauergrünland. Wenn die Bergzonen 1 und 2 mitberechnet werden, sind es sogar nur 47% Ackerland und 53% Dauergrünland (Gisler et al. 2010).

Die Resultate, die im Bericht präsentiert werden, beinhalten aber jeweils die gesamte berechnete Fläche, also auch die Bergzonen 1 und 2.

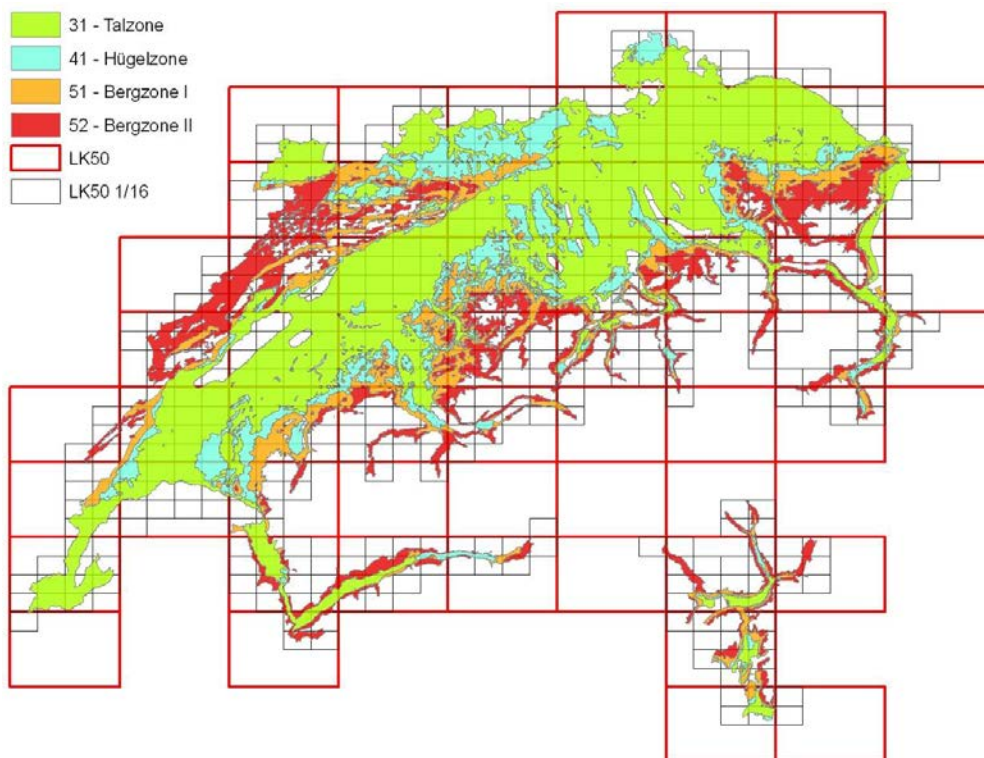


Abbildung 14: Anwendungsgebiet der ERK2 und der Gewässeranschlusskarte.(Quelle: Gisler et al. 2010).

	Offenes Ackerland (ha)	Kunstwiesen (ha)	Reben (ha)	Total (ha)	Prozent von Gesamt
Tal- und Hü- gelzone	256'926	107'885	11'008	375'819	90.2
Bergzone 1+2	12'402	24'541	1'886	38'829	9.4
Bergzone 3+4	382	1'130	133	1'645	0.4
Total	269'710	133'556	13'027	416'293	

Tabelle 4: Anteile des Ackerlandes, Kunstwiesen und Reben in den verschiedenen Landwirtschaftszonen im Jahr 2011. (Quelle: SBV (Schweizerischer Bauernverband) 2011, eigene Darstellung).

4.1 Kartenbeschrieb Gewässeranschlusskarte

Die Karte (Abbildung 15) zeigt mit dem potentiellen Gewässeranschluss die Wahrscheinlichkeit, mit der Bodenmaterial von unbedeckten landwirtschaftlichen Nutzflächen bei einem Erosionsereignis ins Gewässer gelangen kann. Diese Anschlusswahrscheinlichkeit wird in die drei Stufen „niedrig“, „mittel“ und „hoch“ eingeteilt. Der Eintrag kann entweder direkt ins Gewässer oder indirekt über Strassen und Güterwege, Tiefenlinien und Einlaufschächte ins Gewässer erfolgen. In dieser Karte wird optisch nicht zwischen direktem und indirektem Eintrag unterschieden, der direkte Eintrag wird auch nicht höher gewichtet.

In dieser Skala sind in der Karte nur gelbe Flächen für eine niedrige und blaue für eine mittlere und hohe Anschlusswahrscheinlichkeit unterscheidbar. Die blauen Flächen treten vor allem in hügeligen und steilen Gebieten auf. Der Grund dafür liegt vor allem in der Integration der ERK2 ins Modell: Weil in diesen Gebieten das potentielle Erosionsrisiko sehr gross ist, haben in der Karte grössere Flächen eine hohe Anschlusswahrscheinlichkeit (siehe Kapitel 3.2.5). Wenn näher in die Karte hineingezoomt wird, kann es zum besseren Verständnis hilfreich sein, wenn das erweiterte Gewässernetz sichtbar ist. Damit wird nachvollziehbar, auf welche Art die jeweilige Anschlusswahrscheinlichkeit in einer Fläche zustande kommt. Zum besseren Verständnis werden im Kapitel 5 verschiedene Interpretationsbeispiele zu den Karten erläutert.

Gewässeranschlusskarte zur Erosionsrisikokarte der Schweiz (ERK2)

Ohne Bergzone III, IV und Sömmerungsgebiete

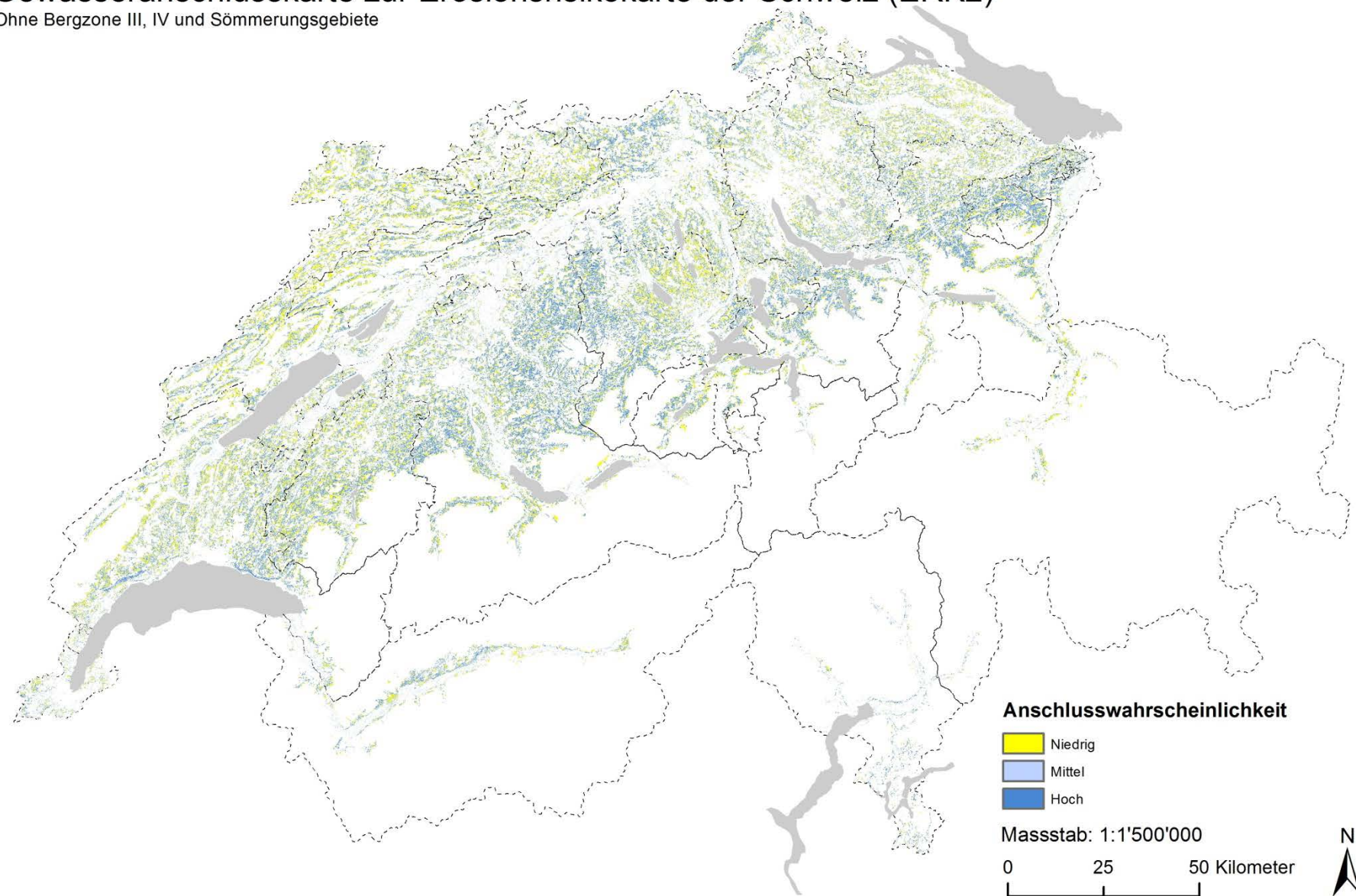


Abbildung 15: Potenzielle Gewässeranschlusskarte zur Erosionsrisikokarte der Schweiz für die landwirtschaftliche Nutzfläche in der Tal- und Hügelizeone sowie in den Bergzonen 1 und 2 (Quelle: eigene Darstellung, hinterlegt mit den Kantons Grenzen und grossen Seen von Swisstopo).

4.2 Direkte und indirekte Gewässeranschlusskarte

Die direkte und indirekte Gewässeranschlusskarte (Abbildung 16) unterscheidet die landwirtschaftlichen Flächen, von denen bei einem Erosionsereignis Bodenmaterial ins Gewässer gelangen kann, in direkt und indirekt ans Gewässer angeschlossene. Es wird unterschieden in „niedrige“, „mittlere“ und „hohe“ Anschlusswahrscheinlichkeit.

Bei Betrachtung der Schweizerkarte kann zwischen Gebieten unterschieden werden, die mehrheitlich einen direkten Gewässeranschluss haben und solchen, deren Flächen eher indirekt am Gewässer angeschlossen sind. Auffällig ist besonders die blaue Zone in den Voralpen, wo häufiger Oberflächengewässer anzutreffen sind und weniger Strassen die Landwirtschaftsflächen verschneiden und somit zu indirektem Anschluss führen. Beim Vergleich mit den Landwirtschaftszonen der Schweiz (Abbildung 14), kann gesehen werden, dass die meisten dieser blauen Gebiete in den Voralpen und im Jura in den Bergzonen 1 und 2 liegen. Es sind aber auch Gebiete erkennbar, die mehrheitlich indirekt am Gewässer angeschlossen sind und in den Bergzonen liegen. Auffällig diesbezüglich ist der Jura, wo es wegen dem kalkigen Untergrund weniger Oberflächengewässer hat.

Ein Gebiet, das vor allem einen indirekten Gewässeranschluss hat, ist das Mittelland. Der Grund dafür könnte die starke Bewirtschaftung des Landwirtschaftslandes und die Eindolung der Oberflächengewässer sein. Diese Beobachtungen werden auch durch die Zahlen bestätigt (siehe Kapitel 4.4).

Gewässeranschlusskarte zur Erosionsrisikokarte der Schweiz (ERK2)

Ohne Bergzone III, IV und Sömmerungsgebiete

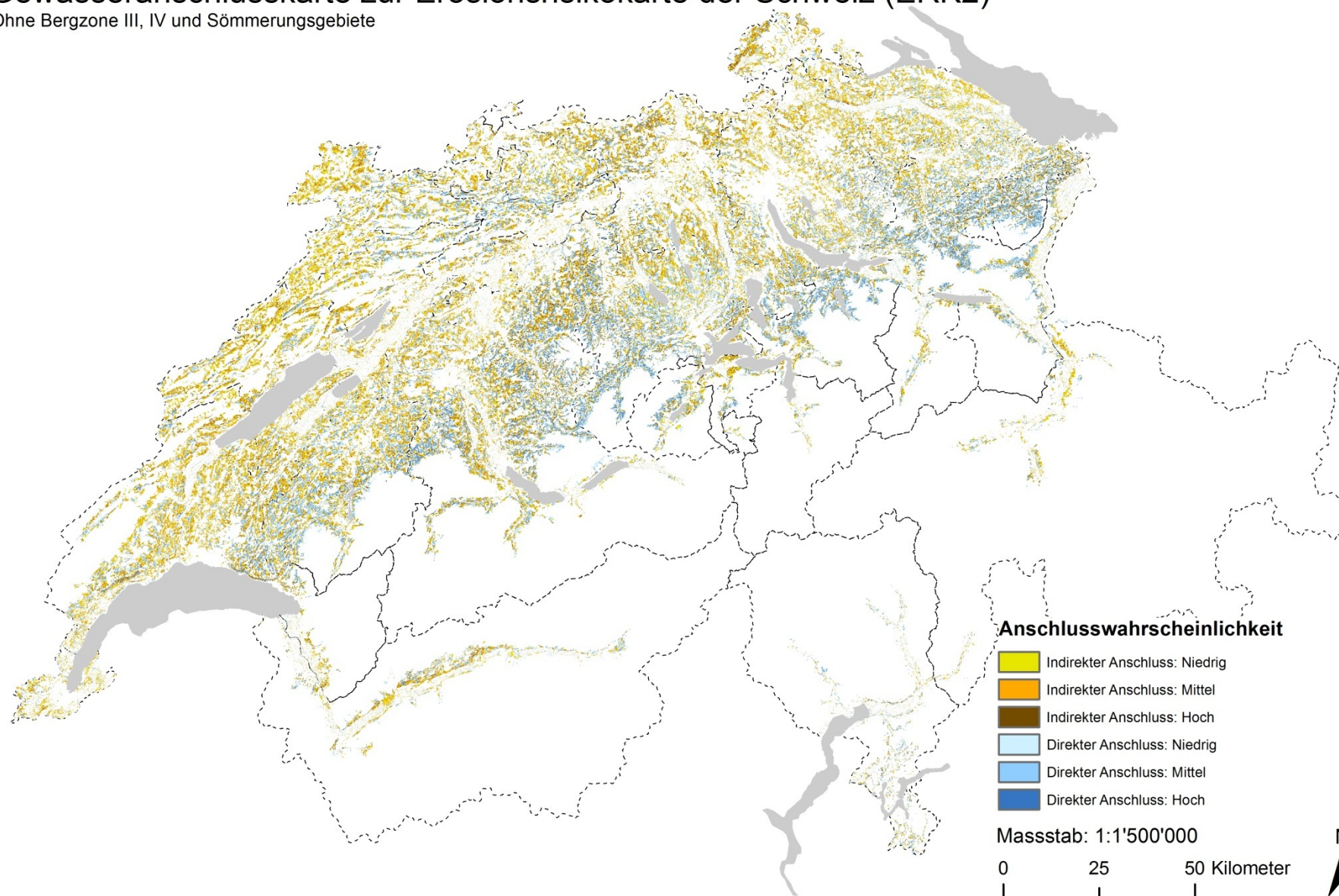


Abbildung 16: Direkte und indirekte Gewässeranschlusskarte zur Erosionsrisikokarte der Schweiz für die landwirtschaftliche Nutzfläche und die Tal- und Hügelzone sowie die Bergzone 1 und 2.. (Quelle: eigene Darstellung, hinterlegt mit den Kantons Grenzen und grossen Seen von Swisstopo).

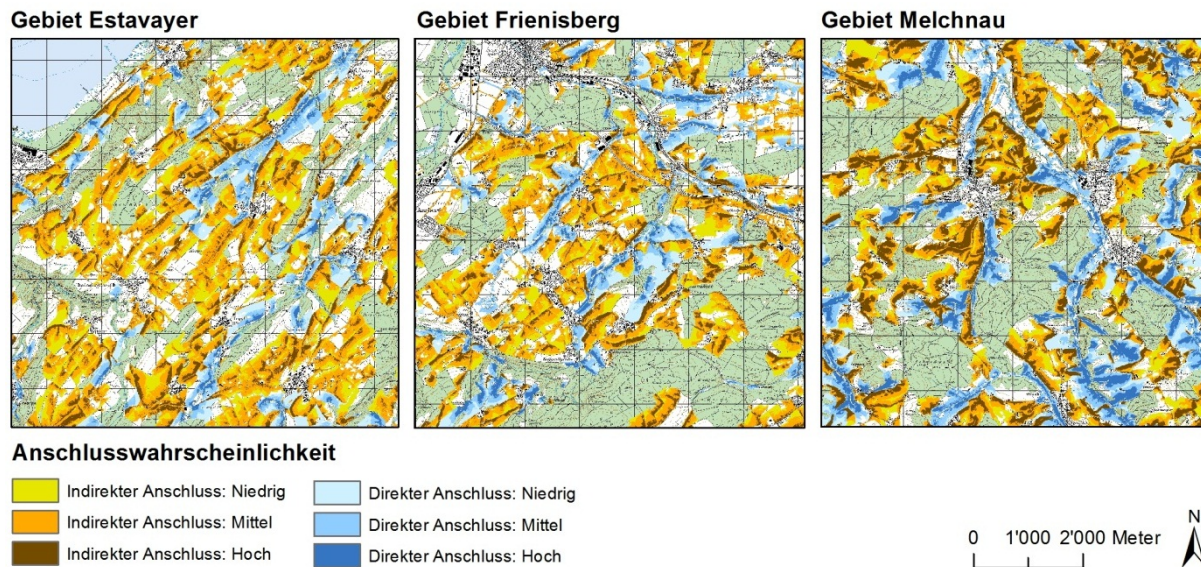


Abbildung 17: Direkter und indirekter Gewässeranschluss potenziell erosionsgefährdeter Flächen in den drei Gebieten Estavayer, Frienisberg und Melchnau. (Quelle: eigene Darstellung, hinterlegt mit der LK25 von Swisstopo).

In Abbildung 17 sind drei Untersuchungsgebiete zu sehen, für die im Rahmen der Aktion COST 634 Erosionsschadenkartierungen gemacht worden sind (Ledermann et al. 2010). Bei der Unterscheidung des direkten und indirekten Gewässeranschlusses sind in den drei Regionen topographische Eigenheiten zu sehen. In Melchnau wird im Vergleich zu den anderen Gebieten sichtbar, dass grosse Flächen eine hohe direkte oder indirekte Anschlusswahrscheinlichkeit und somit auch ein hohes Erosionsrisiko haben. Das liegt vor allem an der starken Hangneigung der Flächen. In allen drei Gebieten sind die Verläufe der Oberflächengewässer anhand der direkt angeschlossenen Flächen sichtbar. In Melchnau hat es demnach deutlich mehr offene Gewässer als in Estavayer und Frienisberg. Estavayer hat als flachstes der drei Gebiete im Verhältnis am meisten indirekt angeschlossene Flächen und Melchnau als steilstes Gebiet am meisten direkt angeschlossene Flächen. Das bestätigt die gesamtschweizerische Beobachtung aus Kapitel 4.2, dass in flacheren Gebieten im Mittelland mehr Flächen indirekt angeschlossenen sind als in hügeligen Gebieten.

Solche Massstäbe sind für die Gewässeranschlusskarte nur geeignet, wenn wie in Abbildung 17 eine Aussage zu einem grösseren Gebiet gemacht werden soll. Sobald auf den Gewässeranschluss eines Feldblockes eingegangen wird, sollten werden kleinere Massstäbe (wie in Kapitel 5) verwendet werden.

4.3 Wichtige Zwischenresultate der Berechnung

Zu den beiden Gewässeranschlusskarten gibt es zwei Zwischenresultate, die zum Verständnis der Berechnung der Anschlusswahrscheinlichkeit wichtig sind. Diese sind das erweiterte Gewässernetz und die Fliessdistanz.

Das erweiterte Gewässernetz zur Gewässeranschlusskarte beinhaltet alle Gewässer, Tiefenlinien und entwässerten Strassen, die im Modell als solche erkannt wurden (siehe Kapitel 3). Um nachzuvollziehen, weshalb eine Fläche eine gewisse Anschlusswahrscheinlichkeit hat, kann dieses Zwischenresultat über die Gewässeranschlusskarte gelegt werden. Das erweiterte Gewässernetz wurde so zusammengestellt, dass es mit der Fliessdistanzrechnung funktioniert und wurde auch nur in diesem Hinblick validiert. Das heisst beispielsweise, wenn eine 3.-Klass-Strasse im erweiterten Gewässernetz enthalten ist, in Realität aber auf einem Damm liegt und keine Entwässerung hat, wird durch die Höheninformation in der Fliessdistanzrechnung kein virtuelles Wasser auf diese Strasse fliessen. Aus diesem Grund sollte das erweiterte Gewässernetz nur mit der Gewässeranschlusskarte verwendet werden.

Ein weiteres Zwischenresultat ist die Fliessdistanzkarte. Sie beschreibt für jede Rasterzelle der Gewässeranschlusskarte die Fliessdistanz zum erweiterten Gewässernetz und kann auch für andere Berechnungen zum Oberflächenabfluss verwendet werden.

4.4 Berechnung verschiedener Statistiken zu den Karten

Für die Gewässeranschlusskarte wurde eine Fläche von 888'050 ha in der Tal-, Hügelzone und Bergzone 1 und 2 berechnet. Dies entspricht nicht der gesamten landwirtschaftlichen Nutzfläche in den genannten Gebieten, da beispielsweise Pufferzonen um Wald und Gewässer vor der Berechnung abgezogen wurden.

	Berechnete Fläche	Kein Gewässeranschluss	Direkter Gewässeranschluss	Indirekter Gewässeranschluss
Tal-, Hügelzone, Bergzone 1 + 2	888'050 ha	45%	21%	34%
Tal- und Hügelzone	606'678 ha	50%	16%	34%
Bergzone 1 + 2	281'372 ha	34%	31%	35%
Talzone	471'623 ha	54%	14%	32%
Hügelzone	135'054 ha	33%	26%	41%
Bergzone 1	113'126 ha	31%	32%	37%
Bergzone 2+	168'247 ha	36%	30%	34%

Tabelle 5: Vergleich der prozentualen Anteile der direkt, indirekt und nicht am Gewässer angeschlossenen landwirtschaftlichen Nutzflächen in den verschiedenen Landwirtschaftszonen der Schweiz. Bergzone 2+ sind die Gebiete die in der Bergzone 2 liegen sowie Feldblöcke die über die Bergzonengrenze hinausragen. (Quelle: eigene Darstellung).

Die Berechnung der prozentualen Anteile von direkt, indirekt oder nicht angeschlossenen Flächen der einzelnen Landwirtschaftszonen belegt die Annahmen, die beim Betrachten der Schweizerkarte auffallen. In der Tal- und Hügelizeone haben halb so viele Flächen einen direkten Gewässeranschluss wie in der Bergzone 1 und 2 und die Hälfte der berechneten Gebiete keinen Gewässeranschluss. Das liegt daran, dass in der Tal- und Hügelizeone viele flache Gebiete liegen, für die der Gewässeranschluss wegen der zu geringen Hangneigung gar nicht erst berechnet wird (siehe Kapitel 3). Dass in der Tal- und Hügelizeone nur so wenig Flächen einen direkten Gewässeranschluss haben, kommt wahrscheinlich von der grossen Menge eingedolter Gewässer im Talboden. Interessant ist, dass sich die Zonen eigentlich nur in den prozentualen Anteilen zum direkten Gewässeranschluss und den nicht angeschlossenen Gebieten unterscheiden, nicht aber beim indirekten Gewässeranschluss. Im Vergleich zwischen Tal- und Hügelizeone und den beiden Bergzonen sind die indirekt angeschlossenen Flächen anteilmässig praktisch gleich gross.

Anschlusswahrscheinlichkeit	Hoch	Mittel	Niedrig
Tal-, Hügelizeone, Bergzone 1 + 2	24%	50%	26%
Tal- und Hügelizeone	20%	54%	26%
Bergzone 1 + 2	32%	44%	24%

Tabelle 6: Vergleich der prozentualen Anteile der Anschlusswahrscheinlichkeiten in den verschiedenen Landwirtschaftszonen der Schweiz. (Quelle: eigene Darstellung).

Die Anteile der einzelnen Anschlusswahrscheinlichkeiten variieren nicht allzu stark zwischen den beiden Landschaftszonen. Auffallend ist aber, dass die mittlere Anschlusswahrscheinlichkeit den grössten Teil der Flächen ausmacht.

Die berechnete Fliessdistanz zum erweiterten Gewässernetz ist im Durchschnitt 150 Meter. Der Median liegt bei 110 Meter.

4.5 Datenabgabe Karten

Die Karten konnten so berechnet werden, dass sie als gesamtschweizerische Rasterfiles in einer Esri Geodatabase abgegeben werden können. Die Grundlagendaten Swissalti3D, Vector25 und Erosionsrisikokarte ERK2 werden nicht abgegeben. Die Karten wurden mit der Kartenprojektion CH1903 (LV03) berechnet. Folgende Karten werden als Resultat der Berechnung abgegeben:

gak_ch	Gewässeranschlusskarte für die Talzone, Hügelzone, Bergzone 1 und 2.
gak_ch_obz	Gewässeranschlusskarte für die Talzone und die Hügelzone; ohne Bergzonen.
gak_ch_di	Direkte/Indirekte Gewässeranschlusskarte für die Talzone, Hügelzone, Bergzone 1 und 2.
gak_ch_di_obz	Direkte/Indirekte Gewässeranschlusskarte für die Talzone und die Hügelzone; ohne Bergzonen.
gak_mitErwGewNetz	Gewässeranschlusskarte mit erweitertem Gewässernetz für die Talzone, Hügelzone, Bergzone 1 und 2.
gak_di_mitErwGewNetz	Direkte/Indirekte Gewässeranschlusskarte mit erweitertem Gewässernetz für die Talzone, Hügelzone, Bergzone 1 und 2.
gak_ch.lyr	Layer-File zur Farbenzuordnung der Gewässeranschlusskarte.
gak_ch_di.lyr	Layer-File zur Farbenzuordnung der Direkten/Indirekten Gewässeranschlusskarte.

Als Zwischenresultate und Ergänzungen zum besseren Verständnis der Gewässeranschlusskarten werden abgegeben:

ErwGewNetz	Das erweiterte Gewässernetz als Shapefile und Raster.
Overlandflowdistance	Die Fliessdistanz zum erweiterten Gewässernetz als Rasterfile.
Ovdir_ch	Die Fliessdistanz zum Gewässernetz (direkter Anschluss).
Flächenanteile	Die Anteile der Flächen ohne Gewässeranschluss und mit einer niedrigen, mittleren oder hohen Anschlusswahrscheinlichkeit.
ErwGewNetz.lyr	Layer File zur Farbenzuordnung des erweiterten Gewässernetzes

Alle anderen Zwischen- und Teilresultate sind in den 1:50'000-Kacheln, in denen die Berechnung stattgefunden hat, erhältlich (Kacheln siehe Abbildung 14).

Um mögliche weitere Auswertungen der Gewässeranschlusskarte zu machen, beispielsweise zum Verhältnis von direktem und indirektem Anschluss in einem bestimmten Gemeinde- oder Kantonsgebiet, sind im Bericht zur Erosionsrisikokarte in Kapitel 7 verschiedene Anleitungen enthalten (Gisler et al. 2010).

5 Interpretationsbeispiele

Zum besseren Verständnis werden im folgenden Kapitel verschiedene Erscheinungsformen in der Gewässeranschlusskarte aufgezeigt und erklärt. Die Gewässeranschlusskarte wird am besten im Massstab 1:5'000 – 1:20'000 verwendet. Bei einem grösseren Massstab kann nicht mehr klar zwischen den Anschlusswahrscheinlichkeiten und dem erweiterten Gewässernetz unterschieden werden. Bei einem kleineren Massstab werden die einzelnen Rasterpunkte sichtbar und die Karte wird zu ungenau.

5.1 Anschlusswahrscheinlichkeit und nicht angeschlossene Flächen

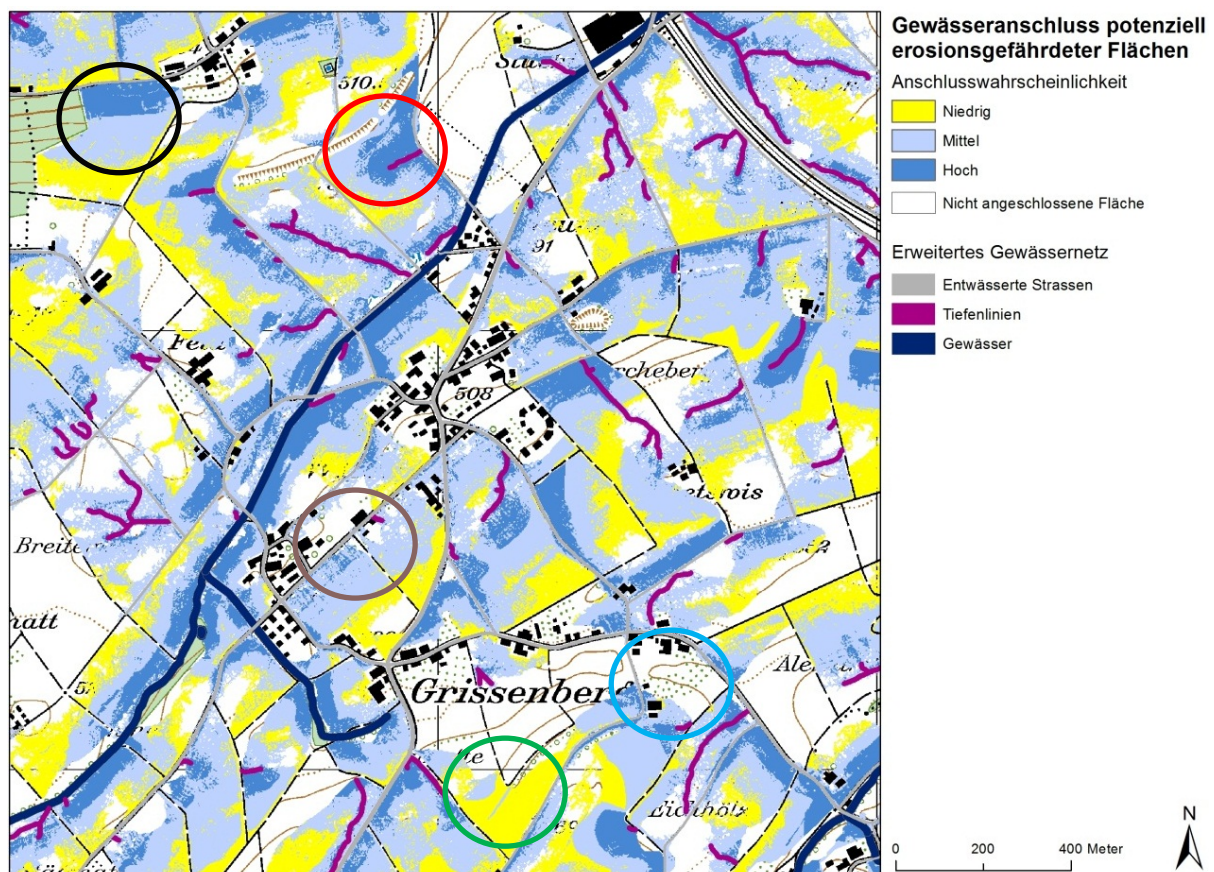


Abbildung 18: Gewässeranschluss potenziell erosionsgefährdeter Flächen, eingekreist sind im Text erwähnte Flächen. (Quelle: eigene Darstellung, hinterlegt mit der LK25 von Swisstopo).

Da die Gewässeranschlusskarte auch aus der Erosionsrisikokarte berechnet wird, spielt das Erosionsrisiko eine wichtige Rolle bei der Klassierung in die drei Anschlusswahrscheinlichkeiten niedrig, mittel und hoch:

- Die dunkelblauen Flächen haben eine hohe Anschlusswahrscheinlichkeit: sie liegen am Entwässerungsnetz und haben ein mittleres bis grosses Erosionsrisiko. Deshalb kann aus diesen

Flächen viel Material abgeschwemmt werden und über Tiefenlinien, Strassen oder auf direktem Weg in die Gewässer gelangen.

Je weiter weg die dunkelblauen Flächen vom erweiterten Gewässernetz liegen, desto grösser ist das zugrundeliegende Erosionsrisiko (siehe Tabelle 3). Für die Fläche im roten Kreis (Abbildung 18) heisst das beispielsweise, dass der Hang, der nördlich der Tiefenlinie liegt, ein grosses Erosionsrisiko hat und das Gebiet zwischen der Tiefenlinie und dem Gewässer flacher ist und deshalb nur im nächsten Umkreis der Strasse eine hohe Anschlusswahrscheinlichkeit besteht.

- Die hellblauen Flächen mit einer mittleren Anschlusswahrscheinlichkeit liegen entweder etwas weiter weg vom erweiterten Gewässernetz und haben ein grosses Erosionsrisiko (schwarzer Kreis) oder liegen etwas näher am Entwässerungsnetz und haben nur ein geringes Erosionsrisiko (brauner Kreis). Wie im Kapitel Statistik beschrieben wurde, ist dies die Kategorie, die am meisten vorkommt. Das liegt daran, dass das Erosionsrisiko oder die Nähe zum erweiterten Gewässernetz ausschlaggebend sein kann.
- Die gelben Flächen mit einer niedrigen Anschlusswahrscheinlichkeit haben eine Fliessdistanz von mindestens 100 Meter zum erweiterten Gewässernetz. Da die Überschätzung der ans Gewässer angeschlossenen Fläche wegen der Multi Flow-Berechnung mit zunehmender Fliesslänge zunimmt, kann es zu unrealistischen Fliesswegen kommen. Dies ist sichtbar im grünen Kreis, wo der Oberflächenabfluss der gelben Fläche nach der Berechnung um die 5.-Klass-Strasse herumfliessen und unten in den Einlaufschacht der Hauptstrasse gelangen könnte.
- Die Landwirtschaftsflächen, auf denen man die Landeskarte im Hintergrund sieht, sind nicht am Gewässernetz angeschlossen. Der Abfluss dieser Flächen wird meistens durch ein abflussbremsendes Landschaftselement absorbiert, wie beispielsweise im blauen Kreis, wo ein Obstgarten in der Talform liegt.

5.2 Direkt und indirekt angeschlossene Flächen

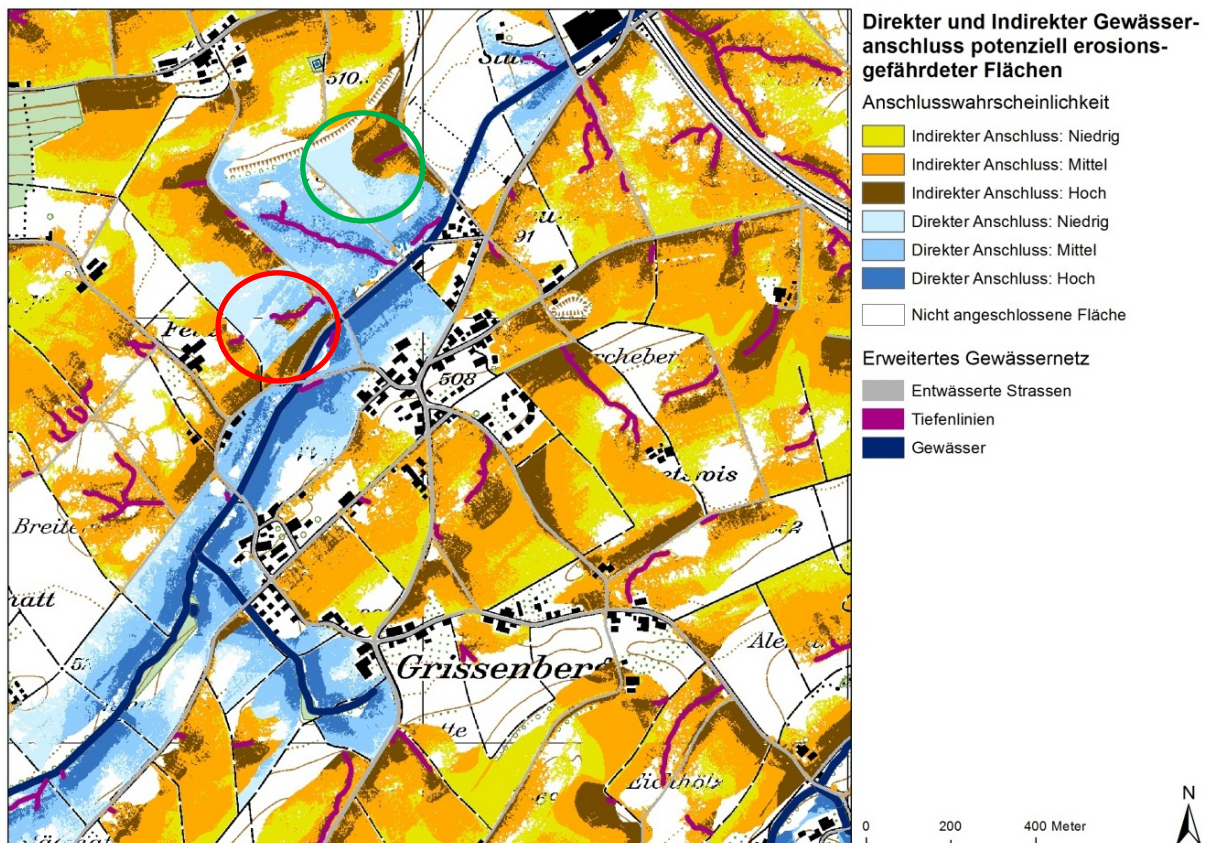


Abbildung 19: Direkter und indirekter Gewässeranschluss potenziell erosionsgefährdeter Flächen. Eingekreist sind im Text erwähnte Flächen. (Quelle: eigene Darstellung, hinterlegt mit der LK25 von Swisstopo).

Die Unterscheidung der landwirtschaftlichen Flächen in direkt und indirekt ans Gewässer angeschlossene zeigt gerade im Gebiet Wiler (Abbildung 19), dass grosse Teile davon nur über Einlaufschächte und Strassen- bzw. Güterwegentwässerungen am Gewässer angeschlossen sind.

Im Vergleich zur Gewässeranschlusskarte ohne Unterscheidung des direkten oder indirekten Anschlusses gibt es in der Karte mit der Unterscheidung teilweise eine Überschätzung der direkt angeschlossenen Fläche. Dies geschieht dadurch, dass die direkt angeschlossenen Flächen sozusagen noch über die Karte mit nur einer Gewässeranschlusskategorie gelegt werden (siehe Kapitel 3.2.4) und kommt vor allem in Feldblöcken vor, von denen ein Teil direkt und der andere Teil indirekt am Gewässer angeschlossen ist. In Abbildung 19 ist das an zwei Orten sichtbar:

- Die Fläche im roten Kreis wird zum grössten Teil als direkt angeschlossen ausgeschieden. Da die Tiefenlinie aber in die Strasse und dort in einen Einlaufschacht fliesst, wäre diese Fläche eigentlich indirekt ans Gewässer angeschlossen (Abbildung 18). Da aber die Tiefenlinie bei der Berechnung des direkten Gewässeranschlusses nicht berücksichtigt wird, fliesst das virtuelle Wasser entlang der Strasse ins Gewässer.

Der Abfluss der Fläche mit einer hohen indirekten Anschlusswahrscheinlichkeit wird nach dem Modell auf der Strasse gebremst und kann somit nur auf indirektem Weg ins Gewässer gelangen.

- Der Oberflächenabfluss der grün eingekreisten Fläche würde wahrscheinlich grösstenteils in die Tiefenlinie fließen. Da aber für den direkten Gewässeranschluss nur die Gewässer und Tiefenlinien, die in Gewässer führen, berücksichtigt werden, wird mit der Multi-Flow-Berechnung auch diese Fläche als direkt angeschlossen ausgeschieden (siehe Kapitel 3.2.4).

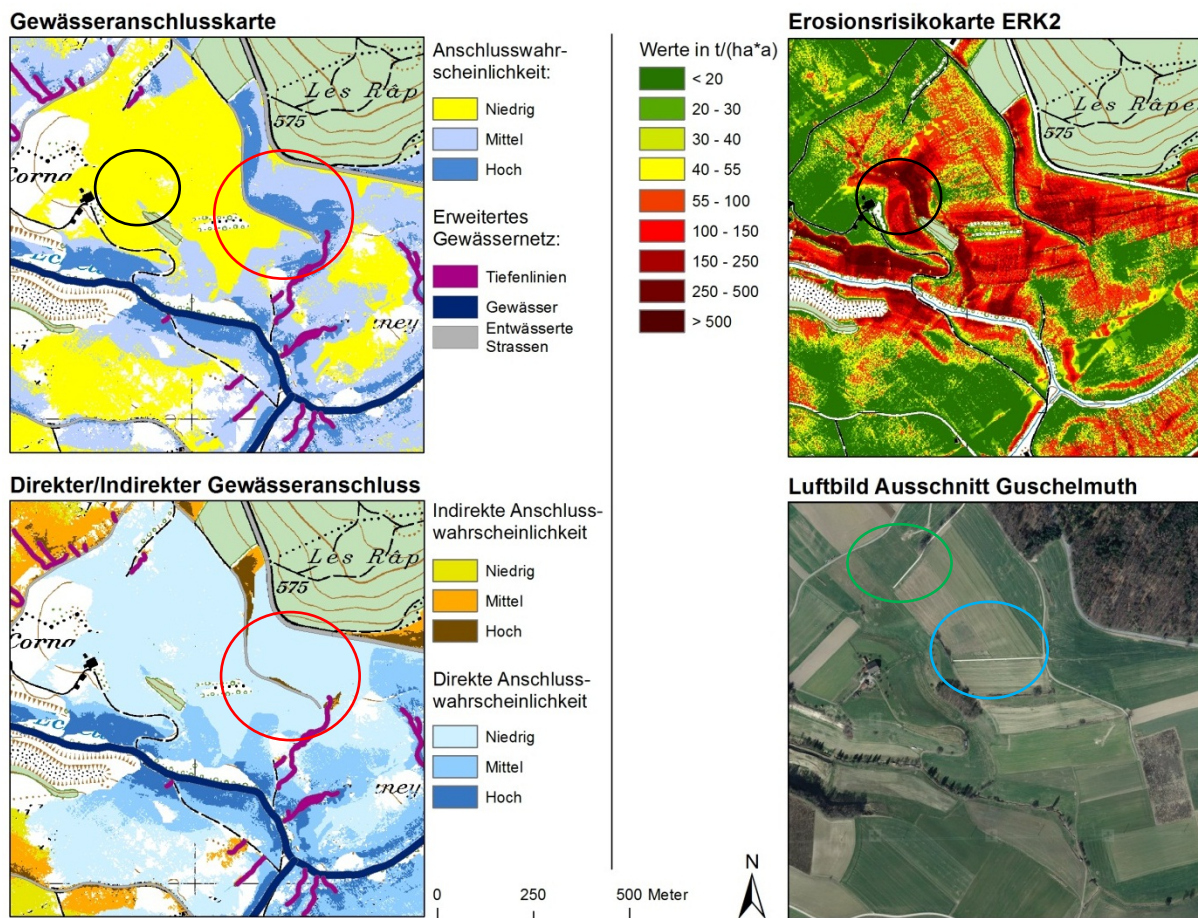


Abbildung 20: Gewässeranschlusskarte, direkter und indirekter Gewässeranschluss, Erosionsrisikokarte und das Luftbild des Ausschnittes Guschelmuth. Eingekreist sind im Text erwähnte Flächen. (Quelle: Gisler et al. 2010, www.map.admin.ch am 15.12.2012, eigene Darstellung).

In Abbildung 20 sind die zwei Versionen der Gewässeranschlusskarte mit und ohne Unterscheidung des direkten/indirekten Anschlusses gegenübergestellt. Dabei ist sichtbar, dass sich die beiden Karten besonders im Bereich des roten Kreises unterscheiden. Da bei der Berechnung des direkten Gewässeranschlusses der Güterweg als abflussbremsend ausgeschnitten wird (siehe Kapitel 3.2.4), ermittelt das Modell dabei alle Rasterzellen, von denen zumindest ein Teil des Oberflächenabflusses um den Güterweg herum und unten ins Gewässer fließen kann. Der Güterweg ist jedoch tatsächlich entwässert und leitet deshalb den Oberflächenabfluss der Flächen oberhalb des Güterweges ab, wie es in der

oberen Karte modelliert ist. Die Tiefenlinie, die unten in die 5.-Klass-Strasse fliesst, ist Teil des erweiterten Gewässernetzes und bleibt bei der für die Berechnung des direkten Gewässeranschlusses unberücksichtigt. Diese etwas verwirrende Situation gibt es, wie weiter oben schon beschrieben wurde, nur in grossen Feldblöcken.

Beim Vergleich der ERK2 mit den Gewässeranschlusskarten fällt auf, dass das schwarz eingekreiste Gebiet mit einem grossen Erosionsrisiko nicht ans Gewässer angeschlossen ist, obwohl dort eigentlich eine Talform anzutreffen ist. Der Grund dafür ist, dass die berechnete Tiefenlinie in das kleine Waldstück fliesst und deshalb aus der Berechnung genommen wird. Unterhalb des Waldes hätte es wieder eine Tiefenlinie, da diese aber vor dem Gewässer noch durch eine Hecke fliesst, spielt sie fürs erweiterte Gewässernetz auch keine Rolle.

Der grüne und blaue Kreis im Luftbild bezeichnen zwei entwässerte landwirtschaftliche Güterwege, die zwischen der Erhebung der verwendeten Vector25-Daten und dem Luftbild neu entstanden sind. Durch diese wird die Entwässerung des Gebietes verändert.

5.3 Das Erweiterte Gewässernetz

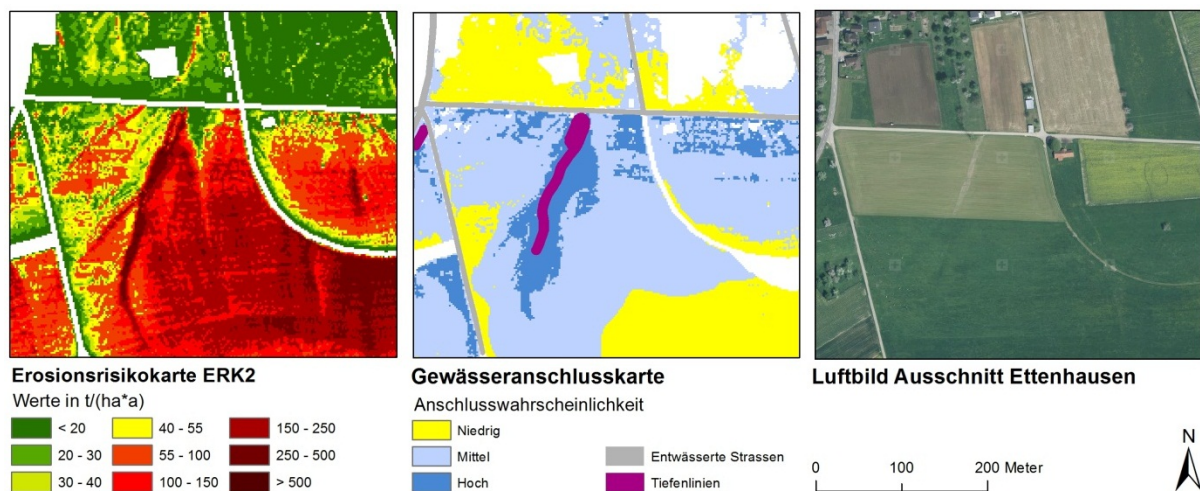


Abbildung 21: Erosionsrisikokarte, Gewässeranschlusskarte und Luftbild einer Tiefenlinie in der Nähe von Ettenhausen. (Quelle: Gisler et al. 2010, www.map.geo.admin.ch am 3.12.2012, eigene Darstellung).

Die Tiefenlinie in Abbildung 21 ist in der ERK2 ebenso sichtbar wie im Luftbild als brauner Streifen im Acker (Erosionsrinne) und wird unten an der Strasse in einen Einlaufschacht abgeleitet. Beim Vergleich der ERK2 mit der Gewässeranschlusskarte wird auch sichtbar, dass nur Zellen mit einem Erosionsrisiko auch eine hohe Anschlusswahrscheinlichkeit erhalten. Der Güterweg mit der Kurve wurde im Modell als abflussbremsend ausgeschieden, weshalb nur die Flächen entlang der Tiefenlinie und an der Querstrasse eine hohe Anschlusswahrscheinlichkeit haben.

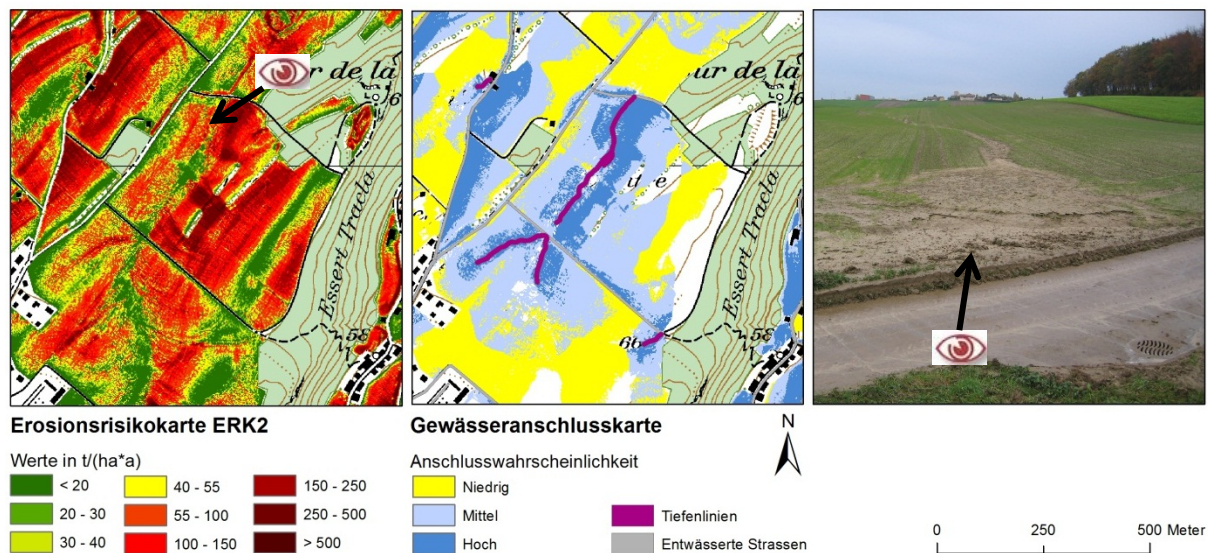


Abbildung 22: Erosionsrisikokarte, Gewässeranschlusskarte und Foto einer Tiefenlinie bei Murist (FR). (Quelle: Gisler et al. 2010, Foto Thomas Ledermann am 4.11.2005, eigene Darstellung).

Das Beispiel in Abbildung 22 zeigt, dass eine Tiefenlinie auch in relativ flachem Gebiet viel Material mitführen kann, wenn dieses an den Seitenhängen des Tales durch Erosion mobilisiert wird. Bei einem starken Regenereignis können grosse Teile des in der Tiefenlinie mitgeführten Bodenmaterials im Einlaufschacht und von dort im Gewässer landen. Sichtbar ist auch, dass die beiden Tiefenlinien in einer Talform liegen, in der der Oberflächenabfluss jeweils durch die Güterwege und deren Entwässerung unterbrochen wird. Das ist auch sinnvoll, denn sonst würde das Wasser die weiter unten liegenden Flächen gefährden.

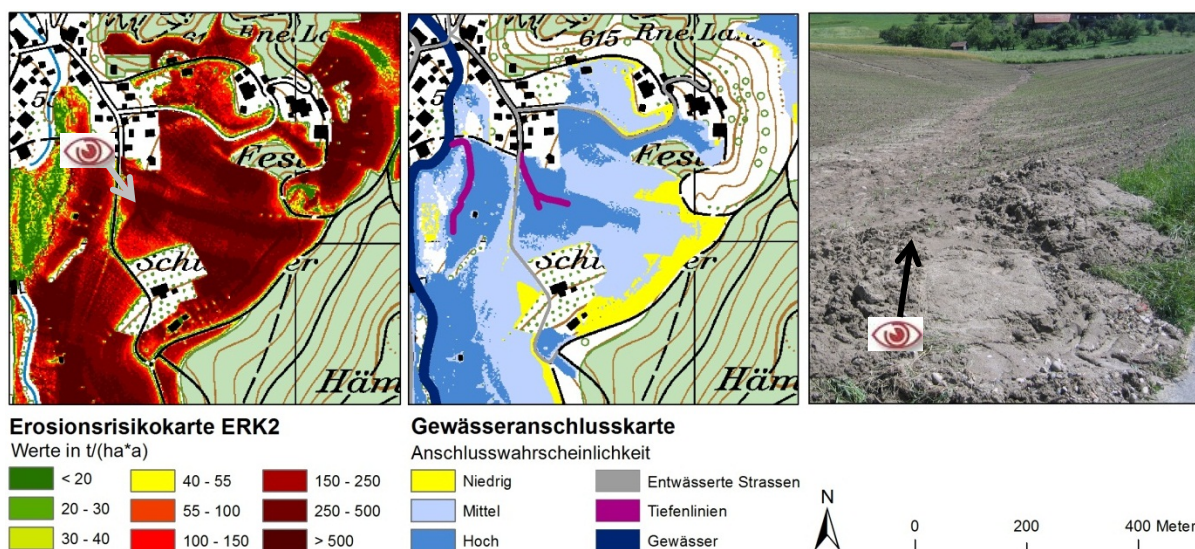


Abbildung 23: Erosionsrisikokarte, Gewässeranschlusskarte und Foto einer Tiefenlinie in Melchnau. (Quelle: Gisler et al. 2010, Foto Thomas Ledermann am 8.6.2007, eigene Darstellung).

Abbildung 23 zeigt eine Tiefenlinie, in der das erodierte Bodenmaterial eines ganzen Hanges akkumuliert und auf die Strasse darunter transportiert wird. Damit der Oberflächenabfluss nicht weiter ins

Dorf fließen kann, hat die Strasse mehrere Einlaufschächte zur Entwässerung. Im Bild ist auch die modellierte Verzweigung der Tiefenlinie sichtbar.

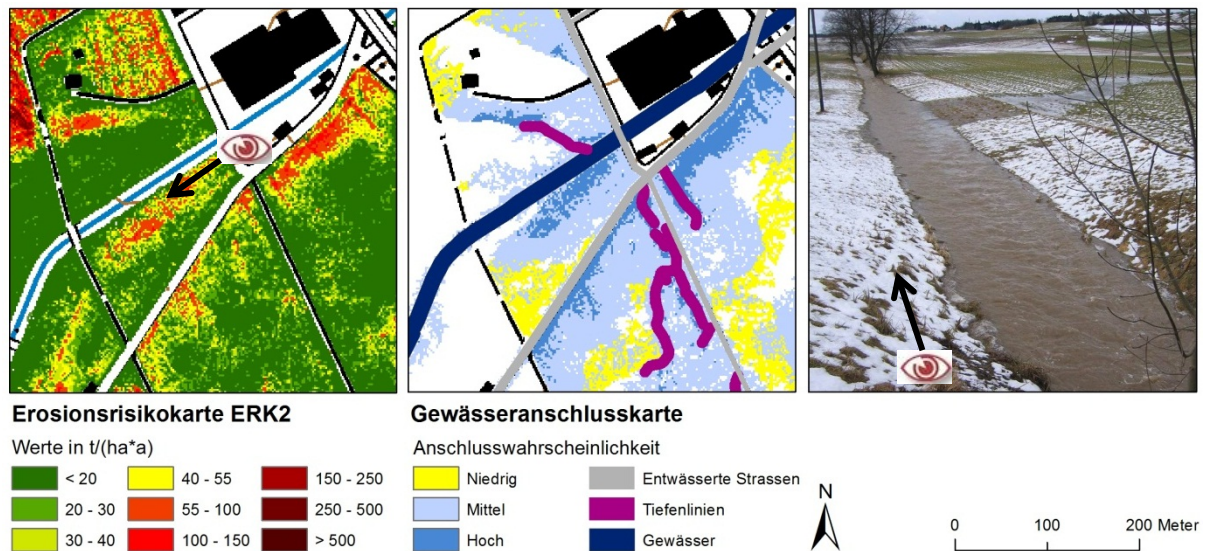


Abbildung 24: Erosionsrisikokarte, Gewässeranschlusskarte und Foto einer ins Gewässer fließenden Tiefenlinie. (Quelle: Gisler et al. 2010, Foto Thomas Ledermann am 9.3.2006, eigene Darstellung).

Tiefenlinien, die ins Gewässer fließen, werden zum direkten Gewässeranschluss dazugerechnet. In der Abbildung 24 ist eine solche Tiefenlinie sichtbar, die eine kleine Fläche mit einem grossen Erosionsrisiko entwässert und dabei durch ein sehr flaches Gebiet fließt.

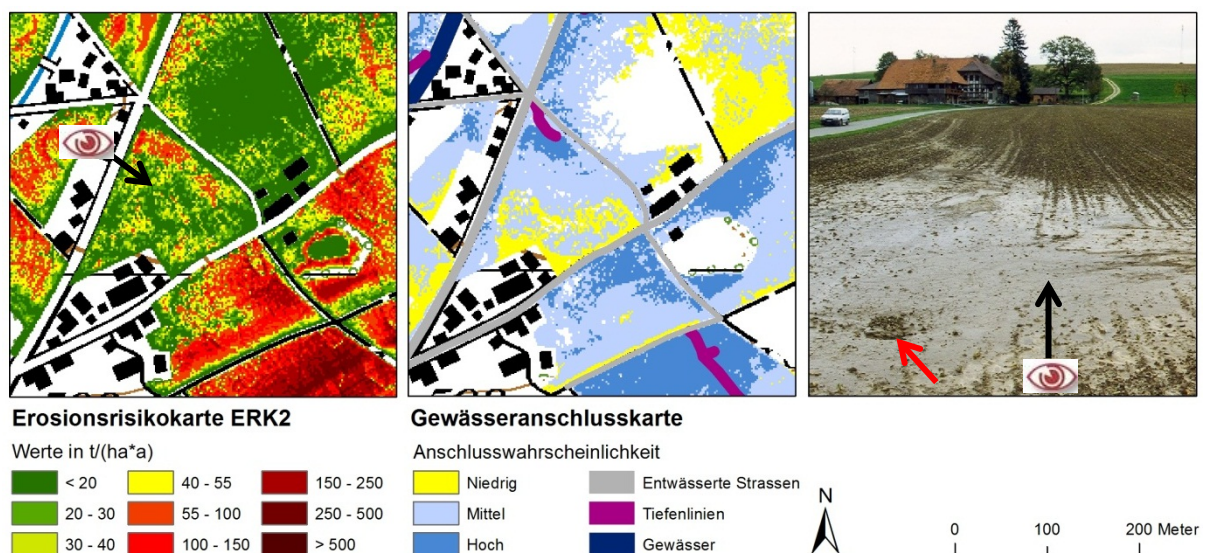


Abbildung 25: Erosionsrisikokarte, Gewässeranschlusskarte und Foto einer Tiefenlinie, die bereits im Feld in einen Einlaufschacht (roter Pfeil) fließt. (Quelle: Gisler et al. 2010, Foto Volker Prasuhn am 28.10.1998, eigene Darstellung).

Zum Teil werden Tiefenlinien schon im Feld mit Einlaufschächten abgeleitet. Die vom Modell ermittelte Tiefenlinie in Abbildung 25 fließt trotz der erhöhten Strasse aus dem Feld hinaus. Der Grund dafür liegt in der Beseitigung der abflusslosen Senken in SAGA-GIS (siehe Kapitel 3.2.3). In Wirk-

lichkeit wird der Oberflächenabfluss der Tiefenlinie bereits im Feld mit einem Einlaufschacht abgeleitet.

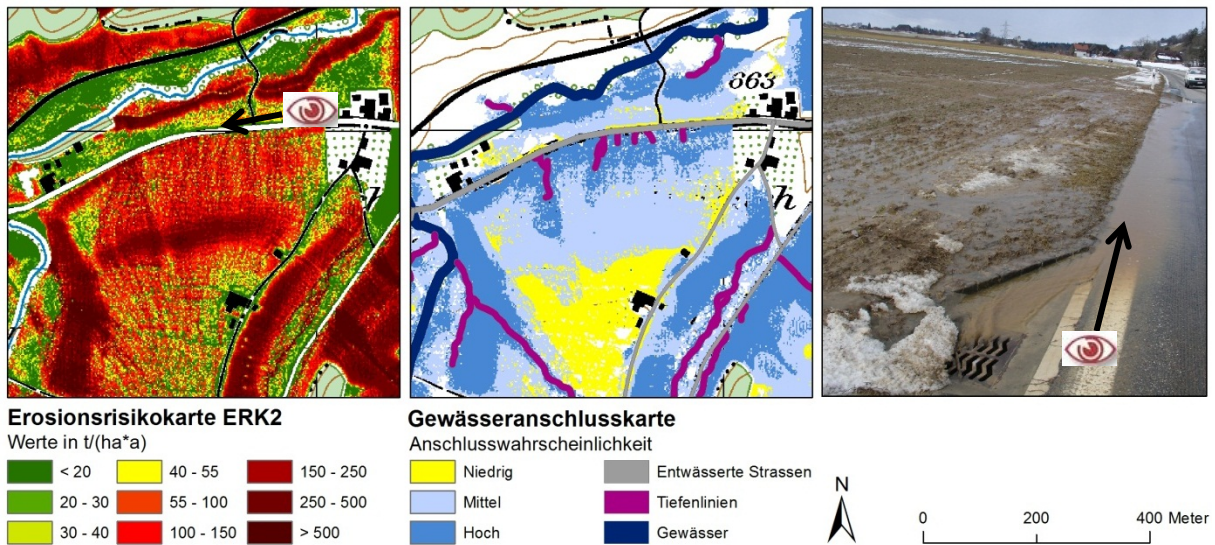


Abbildung 26: Erosionsrisikokarte, Gewässeranschlusskarte und Foto einer gleichmässig zur Strasse geneigten Fläche in Dürrenroth. (Quelle: Gisler et al. 2010, Foto Hanspeter Liniger 10.3.2006, eigene Darstellung).

Wie in Abbildung 26 zu sehen ist, hat der 0.5 Meter breite Pufferstreifen zwischen Acker und Strasse bei einem Erosionsereignis durch die Schneeschmelze keine Wirkung mehr. Zudem ist der Einlaufschacht wieder um diesen halben Meter ins Feld versetzt. Der Oberflächenabfluss der Fläche, die weiter oben ein starkes Erosionsrisiko hat, fliesst unten über eine nur wenig geneigte Fläche auf die Strasse und von dort in den Einlaufschacht.

6 Ausblick

Da die Gewässeranschlusskarte als Erweiterung der Erosionsrisikokarte erstellt wurde, basiert sie auf den gleichen Grundlagendaten, dem 2m-Höhenmodell und Vector25. Für die Berechnung der Fließakkumulationsberechnungen konnte das aktuelle Höhenmodell Swisalti3D verwendet werden, da es von der Ausdehnung und der Rasterzellengrösse gleich ist wie das DTM-AV, das für die ERK2 verwendet worden ist. Als Grundlagenlayer für die Ermittlung der Feldblöcke und der Landschaftselemente wurde wie in der ERK2 Vector25 verwendet, obwohl es ein neues digitales Landschaftsmodell (TLM) gäbe. Ausschlaggebend waren zwei Gründe:

- Da der Feldblockplan der ERK2 mit Vector25 berechnet worden ist, sollten für die Gewässeranschlusskarte die gleichen Feldblöcke verwendet werden. Denn falls sich die Grösse eines Feldblockes im neuen TLM verändert, wäre sein Einzugsgebiet nicht mehr dasselbe und die verschiedenen Fließakkumulationsberechnungen der ERK2 und der Gewässeranschlusskarte würden andere Resultate geben.
- Das Gewässeranschlussmodell wurde für die Vector25-Daten erstellt. Sollten Daten des TLM ins Modell integriert werden, müsste es grundlegend verändert werden, da die Strassenklassen der beiden Landschaftsmodelle nicht dieselben sind (siehe Kapitel 2.3).

Die Gewässeranschlusskarte zeigt - wie die Erosionsrisikokarte - eine potenzielle Gefährdung über die gesamte landwirtschaftliche Nutzfläche der Schweiz ohne die Bergzone 3 und 4 sowie das Sömmerungsgebiet. Um die Karte nur auf die wirklich relevanten Fruchtfolgeflächen anzupassen, müsste sie deshalb mit einem Datensatz verschnitten werden, der nur das tatsächliche Ackerland beinhaltet.

Um aus der potenziellen Gewässeranschlusskarte eine Karte des aktuellen Gewässeranschlusses zu machen, müsste zum Einen bei der Erosionsrisikokarte ein aktueller, nutzungsspezifischer C-Faktor berücksichtigt werden. Zum Anderen müsste die abflussbremsende Wirkung von Pufferstreifen und anderen baulichen Schutzmassnahmen (z.B. Wasserableitungen, kleine Dämme etc.) integriert werden.

Eines der Hauptprobleme des Gewässeranschlussmodells war die Ermittlung der Entwässerung der Strassen und Güterwege. Sie ist auch eine der grössten Unsicherheiten der Karte, denn wenn beispielsweise eine modellierte Tiefenlinie an einer Strasse nicht in einen Einlaufschacht führt, weil die Strasse nicht entwässert ist, wird der ganze Feldblock oberhalb fälschlicherweise als angeschlossen ausgeschieden.

Um die Gewässeranschlusskarte zu aktualisieren, sollte aber auch das Modell überprüft werden. Denn eventuell wird es in Zukunft möglich sein, Multi-Flow-Berechnungen in ArcGIS zu machen und so-

mit das ganze Modell in einem Programm zusammenzufassen. Dies würde die Erneuerung der Karte stark vereinfachen, da so das Modell nicht mehr halbautomatisiert ablaufen müsste.

Die potentielle Gewässeranschlusskarte erosionsgefährdeter Flächen zeigt in einer Art „Worst-Case-Szenario“ (permanente Schwarzbrache, keine Pufferstreifen oder bauliche Massnahmen) Flächen auf, auf denen bei nicht standortgerechter Bewirtschaftung mit einer erheblichen Gefahr für Stoffeinträge in Gewässer gerechnet werden muss. Sie bildet damit ein Hilfsmittel für eine zielgerichtete Massnahmenplanung im Gewässerschutz, sei es auf der angeschlossenen erosionsgefährdeten Parzelle selbst oder für die Anlage geeigneter Pufferstreifen oder anderer baulicher Massnahmen an der Übertrittsstelle ins Gewässer. Im Zusammenhang mit Strukturverbesserungsmassnahmen gemäss Art. 14 SVV (Strukturverbesserungsverordnung) können auch Massnahmen zur Verhinderung von Erosion und Oberflächenabfluss von Bund und Kantonen unterstützt werden (z.B. Versickerungsanlagen, Rückhalteräume, Dämme, Bachöffnungen, Renaturierungen, etc.).

Literaturverzeichnis

- Alder S.**, 2012. Modellierung des Gewässeranschlusses potenziell erosionsgefährdeter Flächen im schweizerischen Mittelland. Masterarbeit am Geographischen Institut der Universität Bern, Bern.
- Aurbacher J., Billen N., Botschek J., Brandhuber R., Butz J., Christoffels E., Dorp M., Ernstberger H., Feldwisch N., Fiener P., Haider J., Kaufmann-Boll C., Marahrens S., Möller M., Mollenhauer K., Müller E., Prasuhn V., Rippel R., Rode M., Schmidt W., Schmittner A., Schröder A., Senger M., Severin K., Tetzlaff B., Unterseher E.**, 2012. Berücksichtigung der Bodenerosion bei der Massnahmenplanung nach EG-Wasserrahmenrichtlinie. Merkblatt DWA-M910, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA), Hennef, 119 S.
- Bug J., Mosimann T.**, 2011. Modellierung des Gewässeranschlusses von erosionsaktiven Flächen. Naturschutz und Landschaftsplanung 43, Nr. 3; S. 77-84.
- Burgos S., Noll D.**, 2010. Etude des risques d'érosion et de transfert, Zone d'étude d'Avenches et environs. Ecole d'ingénieurs de Changins.
- BUWAL**, 1996. Gewässerschutzmassnahmen beim Strassenbau: Grundlagebericht. Schriftenreihe Umwelt Nr. 263.
- Cimmery V.**, 2010. User Guide for SAGA (Volume 1). <http://sourceforge.net/projects/saga-gis/files/SAGA%20-%20Documentation/>; Zugriff: 13.10.2012.
- Doppler T., Camenzuli L., Hirzel G., Krauss M., Lück A., Stamm C.**, 2012. Spatial variability of herbicide mobilisation and transport at catchment scale: insights from a field experiment. Hydrology and Earth System Sciences Discussion 9, Nr. 2, S. 2357-2407.
- Freeman T.**, 1991. Calculating catchment area with divergent flow based on a regular grid. Computers & Geosciences 17, Nr.3, S. 413-422.
- Frey M., Konz N., Stamm C., Prasuhn V.**, 2011. Machbarkeitsstudie Kartierung beitragender Flächen. Studie im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt BAFU. Zürich. <http://www.eawag.ch/forschung/uchem/schwerpunkte/projektuebersicht/projekt36/Machbarkeit>; Zugriff: 13.4.2012.
- Gassmann S.**, 2011. Appréciation du risque d'érosion des sols agricoles et proposition de mesures de lutte (exemple sur une zone pilote à Avenches, VD). Bulletin der Bodenkundlichen Gesellschaft der Schweiz BGS 32, S. 71-84. Lausanne. http://www.soil.ch/doku/bull32_16_81-84.pdf; Zugriff: 20.3.2012.

- Gisler S., Liniger H. P., Prasuhn V.**, 2011. Erosionskarte im 2x2-Meter-Raster. Agrarforschung Schweiz 2, Nr. 4, S. 148–155.
- Gisler S., Liniger H., Prasuhn V.**, 2010. Technisch-wissenschaftlicher Bericht zur Erosionsgefährdungskarte der landwirtschaftlichen Nutzfläche der Schweiz im 2x2-Meter-Raster (ERK2). CDE Universität Bern und ART Zürich Reckenholz. Bern. 113 S.
- Halbfass S.**, 2005. Entwicklung eines GIS-gestützten Modells zur Quantifizierung diffuser Phosphoreinträge in Oberflächengewässer im mittleren Massstab unter Berücksichtigung geoökologisch wirksamer Raumstrukturen. Dissertation an der Technischen Universität Dresden. Dresden.
- Halbfass S., Grunewald K.**, 2008. Ermittlung räumlich verteilter Sediment Delivery Ratio zur Modellierung von Sedimenteinträgen in Fliessgewässer im mittleren Massstab. Wasserwirtschaft Nr. 3, S. 31-35.
- Hensel H., Bork H.-R.**, 1988. Computer aided Construction of Soil Erosion and Deposition maps. Geologisches Jahrbuch Reihe A, (104), S. 357–371.
- Jordi B.**, 2006. Erforschung des Dach- und Strassenabwassers. Informationsbulletin des Amtes für Gewässerschutz und Abfallwirtschaft des Kantons Bern (GSA). Bern.
- Kipfer A., Mani P., Stüdi T.**, 2009. Modellierung Oberflächenabfluss - Methodenevaluation. Bericht des geowissenschaftlichen Büros Geo7 AG zuhanden der Gebäudeversicherung Zürich. Bern.
- Kuonen V.**, 1983. Wald- und Güterstrassen: Planung, Projektierung, Bau. Pfaffhausen. 743 S.
- Ledermann T., Herweg K., Liniger H. P., Schneider F., Hurni H., Prasuhn V.**, 2010. Applying erosion damage mapping to assess and quantify off-site effects of soil erosion in Switzerland. Land Degradation & Development 21 Nr. 4, S. 353-366.
- Mosimann T., Crole-Rees A., Maillard A., Neyroud J.-A., Thöni M., Musy A., Rohr W.**, 1990. Bodenerosion im schweizerischen Mittelland , Ausmass und Gegenmassnahmen. Bericht 51 des nationalen Forschungsprogramms “Nutzung des Bodens in der Schweiz”. Bern.
- Muth W.**, 1991. Wasserbau: landwirtschaftlicher Wasserbau - Bodenkultur. Werne Ingenieur Texte. Düsseldorf. 288 S.
- Noll D.**, 2009. Appréciation des risques de transfert de pesticides : Exemple du N-E du bassin versant du Boiron de Morges. Mémoire de Master. Ecole d'ingénieurs de Changins.

- Prasuhn V.**, 2005. Phosphorbelastung der Oberflächengewässer durch Erosion. Schriftenreihe der FAL 57, Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau Zürich-Reckenholz (FAL), S. 108-119.
- Prasuhn V.**, 2011. Soil erosion in the Swiss midlands: Results of a 10-year field survey. *Geomorphology* 126, S. 32-41.
- Prasuhn V., Grünig K.**, 2001. Evaluation der Ökomassnahmen - Phosphorbelastung der Oberflächengewässer durch Bodenerosion. Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau Zürich-Reckenholz (FAL). Schriftenreihe der FAL 37. Reckenholz.
- SBV** (Schweizerischer Bauernverband), 2011. Statistische Erhebungen und Schätzungen über Landwirtschaft und Ernährung. Brugg.
- Schäuble H.**, 2005. AVErosion 1.1 für ArcView 3.x. Tübingen. <http://www.terracs.com/fileadmin/webpage/docs/averosion-german.pdf>; Zugriff: 23.3.2012.
- Stamm C., Doppler T., Prasuhn V., Singer H.**, 2012. Standortgerechte Landwirtschaft bezüglich der Auswirkung von landwirtschaftlichen Hilfsstoffen auf Oberflächengewässer: Projekt-Schlussbericht, Studie im Auftrag des BAFU. Zürich.
- Swisstopo**, 2007. VECTOR25 - Das digitale Landschaftsmodell der Schweiz. Wabern. <http://www.swisstopo.admin.ch/internet/swisstopo/de/home/products/landscape/vector25.html>; Zugriff: 21.3.2012.
- Swisstopo**, . 2012a. swissALTI3D Ausgabebericht 2012. <http://www.swisstopo.admin.ch/internet/swisstopo/de/home/products/height/swissALTI3D/swissALTI3D.parsys.13145.downloadList.45414.DownloadFile.tmp/swissalti3drelease2012de.pdf>; Zugriff: 20.12.2012.
- Swisstopo**, 2012b. Objektkatalog swissTLM3D. Wabern. <http://www.swisstopo.admin.ch/internet/swisstopo/de/home/products/landscape/swissTLM3D.html>; Zugriff: 21.3.2012.
- Tarboton D.**, 1997. A New Method For The Determination Of Flow Directions And Upslope Areas In Grid Digital Elevation Models. *Water Resources Research* 33, S. 309-319.

Anhang

Anhang 1: Tabelle zu den Strassenklassen der Landeskarte 1:25'000, Pufferbreiten der ERK2 und Strassenklassen des TLM. (Quelle: Swisstopo 2007 und 2012, Gisler et al. 2010, Alder 2012).

Objektname	Beschreibung	Strassenbelag	Pufferbreite der ERK2	Neue TLM-Definition
Autobahn und -strasse	-2-4 Fahrspuren	Hartbelag	6-12 m	Hochleistungsstrasse
1.-Klass-Strasse	-Mind. 6 m breit -Steigungen unter 10% -meistens Hauptstrassen	Hartbelag	5 m	10m- oder 6m-Strasse
2.-Klass-Strasse	-Mind. 4 m breit -Steigungen unter 15% -oft Nebenstrassen oder Ortsverbindungen	Hartbelag	4 m	4m-Strasse
Quartierstrasse	-Mind. 4 m breit -ohne Bedeutung für Durchgangsverkehr	Hartbelag	2.5 m	4m-Strasse
3.-Klass-Strasse	-Mind. 2.80 m breit -Kreuzen nur bei Ausweichstellen -zur Erschliessung von Dörfern und Weilern -bei normalen Verhältnissen mit Lastwagen befahrbar	Meistens Hartbelag	3 m	3m-Strasse
4.-Klass-Fahrweg	-Mind. 1.80 m breit -Bei normalen Verhältnissen mit Personenwagen befahrbar -Wege für Land- und Forstwirtschaft	Zum Teil Hartbelag, oft Naturstrassen mit Grasstreifen in der Mitte	3 m	2m-Weg
5.-Klass-Feld-, Wald-, Veloweg	-Feld- und Waldweg -oft nur mit Traktor oder Geländefahrzeug befahrbar -schlecht unterhaltener Wirtschaftsweg	Oft ohne ausreichenden Unterbau	3 m	2m-Weg
6.-Klass-Fussweg	-Vom Bergpfad bis zum Spazierweg -für Fussgänger bestimmt	Wanderweg	2.5 m	1m-Weg

Anhang 2: Pufferbreiten der ERK2 (Gisler et al. 2010), an Gewässeranschluss angepasst.

Kategorien und Attribute von Vektor 25

effektiv verwendet

Kategorie

Objektart	Attributnamen	ObjectVal	Verwendung	Buffer
			Grundlayer Eingeschnittene Attribute	Angewendet
Primärflächen				
Flächen-Objektarten	Übriges Gebiet	Z_Uebrig		
	Reben	Z_Reben		
	Fluss	Z_Fluss		6
	See	Z_See		6
	Sumpf und Gebüsch	Z_SumGeb		3
				3
	Sumpf in Wald	Z_SumWa		3
	Sumpf in offenem Wald	Z_SumWaO		3
	Wald	Z_Wald		3
	Wald offen	Z_WaldOf		3
Strassennetz				
Linien-Objektarten	Autobahn	Autobahn		12
	Autobahn richtungsgetrennt	Autob_Ri		14
	Autostrasse	Autostr		6
	Ein-/Ausfahrt	Ein_Ausf		4
	Autobahnzufahrt	A_Zufahrt		4
	1. Klass Strasse	1_Klass		5
	2. Klass Strasse	2_Klass		4
	3. Klass Strasse	3_Klass		3
	4. Klass Strasse	4_Klass		3
	5. Klass Strasse	5_Klass		3
	6. Klass Strasse	6_Klass		2.5
	Quartierstrasse	Q_Klass		2.5
Eisenbahnnetz				
				Variante 1
Linien-Objektarten	Normalspurbahn mehrgleisig	NS_Bahn2		7
	Normalspurbahn eingleisig	NS_Bahn1		5
	Schmalspurbahn mehrgleisig	SS_Bahn2		5
	Güterbahn	Gt_Bahn		4
	Museumsbahn	MS_Bahn		4
	Industriegeleise	I_Geais		3
	Schmalspurbahn eingleisig	SS_Bahn1		3
	Strassenbahn	Str_Bahn		3
	Streckenverknüpfung innerhalb des Bahnhofareals	Str_Bhof		3

Gewässernetz			Bachvariante	
			Puffer + Schutzstreifen	
Linien-Objektarten	Bach, kleiner Fluss	Bach		3 + 6
	fiktiver Bachverlauf	Bachachs		3 + 6
	Bach eingedolt	Bach_U		3 + 6
	Fluss	Fluss		6 + 6
	Bach ohne Erkennbare /	Kanal		3 + 6
	Fiktive Seeachse innerhalb eines	Seeachse		3 + 6
	Seeufer	See		3 + 6
Gebäude				
Flächen-Objektarten	Gebäude / Einzelhaus	Z_Gebaeude		
	Innenhof	Z_Innenhof		
	Abgelegener Gasthof	Z_Gasthof		
	Hütte	Z_Huette		
	Kirche	Z_Kirche		
	Kühlturm	Z_Kuehlturm		
	Lagertank	Z_Lagertank		
	Perrondach	Z_Perron		
	Schiessstand, Schützenhaus	Z_Schiessstand		
	Schloss, Burg	Z_Schloss		
	Station / ÖV Haltestelle	Z_Station		
	Treibhaus	Z_Treibhaus		
	Wasserbecken (Schwimmbäder, Z_WBecken			
	Hecken und Bäume			
Punkt-Objektarten	Einzelbaum	EinBaum		1.25
	Obstbaum	ObstBaum		1.25
			Heckenvariante	
			Puffer + Schutzstreifen	
Linien-Objektarten	Baumreihe	BauReihe	nähe Fluss (20m) / im Feld	1 + 3
	Hecke	Hecke		1 + 3
	Obstbaumreihe	OBReihe		1 + 3
Anlagen				
Flächen-Objektarten	Bahnhofareal	Z_BhArea		
	Flughafenareal	Z_FlArea		
	Flughafenbahnhofareal	Z_FlugBh		
Einzelobjekte				
Linien-Objektarten	Böschungsoberkante	BoeschOK		6
	Böschungsunterkante	BoeschUK		8

Puffer wirken immer zweiseitig. Um die Breite eines Linienelements mit Puffer zu erhalten, muss der angegebene Wert mit 2 multipliziert werden.