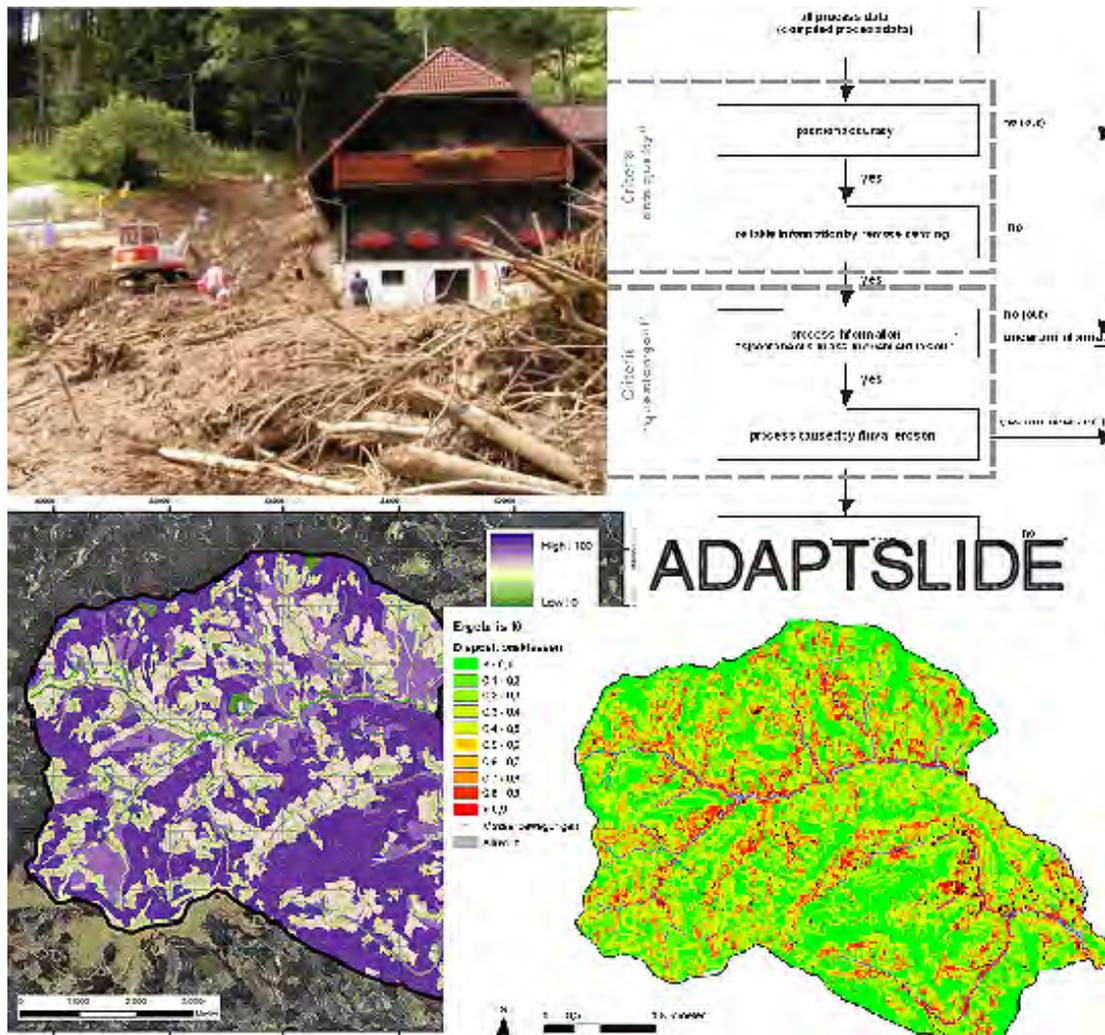


Zusammenfassung –Endbericht

Modellierung von Rutschungsdispositionen und Prozessbereichen – Prozessspezifische Bewertung von Datengrundlagen, Methoden und Ergebnissen für das Gemeindegebiet von Gasen und Haslau (AdaptSlide)



Beauftragung: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW), Abt. IV/5 Wildbach- und Lawinenverbauung

In Kooperation:



Wien, Juli 2011

Modellierung von Rutschungsdispositionen und Prozessbereichen in den Gemeinden Gasen und Haslau, (AdaptSlide)

Zusammenfassung

1. Einleitung

Die im Zuge des Klimawandels möglichen Änderungen im Niederschlagsgeschehen werden im Alpenraum voraussichtlich zu Änderungen der Gefährdungen durch Naturprozesse im Allgemeinen und im Speziellen auch durch Massenbewegungen führen (Hagen & Andrecs 2011, Andrecs et al 2010). Demgegenüber stehen Defizite zur flächendeckenden Abschätzung der Rutschungsdisposition. Ist der „Status Quo“ der Rutschungsdisposition nicht bekannt, so lassen sich auch Änderungen und Auswirkungen derselben kaum abschätzen.

Im Zuge von in letzter Zeit in Österreich gehäuft auftretenden Rutschungsereignissen (Gasen 2005 (BMLFUW 2006, Andrecs et al. 2007, Tilch et al. 2009), Vorarlberg 2005 (BMLFUW 2006, Markart et al. 2007, Tilch & Kociu 2006), Klingfurth 2009 (Chiffard & Tilch 2010, Tilch 2009), Feldbach und Umgebung 2009 (Haberler et al. 2009, Schwarz et al. 2009)) wurde daher vom BMLFUW (Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft) eine Kooperation zwischen dem BFW (Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft) der GBA (Geologische Bundesanstalt) dem JR (Joanneum Research Graz) und der ZAMG (Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik) initiiert.

Details zu den im Folgenden beschriebenen Datengrundlagen, Analysen, Methoden, deren Validierung, Ergebnisse und Schlussfolgerungen sind dem AdaptSlide-Endbericht zu entnehmen.

2. Ziel

Im Rahmen des EU Alpine Space Projektes AdaptAlp wurde unter dem Titel AdaptSlide (Modelling of slide disposition and process-area in the communities of Gasen and Haslau) mit umfangreichen Arbeiten begonnen, die als „over all“ Ziel einen Überblick über verfügbare Methoden, deren Verbesserung bzw. Weiterentwicklung und ihre Bewertung hatten. Im Detail wurden folgende Ziele verfolgt:

- Modell Inputdaten: Eignung bestehender Datensätze und Schaffung verbesserter Modellierungsgrundlagen.
- Modellierung der Rutschungsdisposition (für spontane, eher flachgründige gravitative Massenbewegungen im Lockersediment wie z.B. Lockergesteinsrutschungen, Hangmuren). Vergleich und Bewertung der mit

unterschiedlichen Modellierungsmethoden erstellten Rutschungsdispositionskarten unter Berücksichtigung unterschiedlicher Basisdaten und unterschiedlicher Parameterkombinationen.

- Entwicklung einer Methode zur flächendeckenden Abschätzung des gesamten Prozessbereiches auf Basis der erstellten Dispositionskarten.
- Beurteilung des Potenzials der Methoden zur Abschätzung der Auswirkungen auf Rutschungen bei sich ändernden Rahmenbedingungen (Klimaänderung, Flächennutzung).
- Abschätzung von Kosten und Aufwand für die Erstellung diverser Grundlagendaten und die Anwendung der verschiedenen Methoden.

3. Projektgebiet

Im Fall des im Rahmen des Projektes ADAPTSLIDE-ADAPTALP bearbeiteten Gebietes „Gasen-Haslau“ handelt es sich um eine Region, die zuletzt im August 2005 im Zuge hoher Gebietsvorfeuchte und mehrtägig andauernder Niederschläge von zahlreichen gravitativen Massenbewegungen (v.a. Lockergesteinsrutschungen und Hangmuren) betroffen war, die schwere Schäden verursachten (Tilch & Koçiu 2006). Insgesamt wurden im Projektgebiet über mehrere Tage hinweg mehr als 770 gravitative Massenbewegungen ausgelöst (Tilch et al. 2009), Abb. 3-2, Gebietsfläche: ca. 50 km²). Sowohl die Infrastrukturbauten (Stromleitungen, Trinkwasserleitungen) und Gebäude (Wohnhäuser, Wirtschaftsgebäude) innerhalb der Ortschaften, als auch die Verbindungsstraßen zwischen den Ortschaften wurden vielerorts verwüstet. Über den erheblichen reinen Sachschäden hinaus kam es in der Ortschaft Gasen zu einem tragischen Ereignis (Abb. 3-1), bei dem eine Hangmure das am Hangfuß liegende Haus fast vollständig zerstörte. Zwei Menschen kamen dadurch ums Leben.



Abbildung 3-1: Durch Hangmure zerstörtes Haus in Gasen. Fotoquelle: Fotoarchiv der GBA

Das Projektgebiet liegt im Nordosten des Bundeslandes Steiermark im südlichen Bereich der Fischbacher Alpen. Die Landschaft hat Mittelgebirgscharakter, wobei die Seehöhen auf kurzen Distanzen zwischen 600 und 1.500 m ü. A. variieren. Aufgrund

der Landschaftsgenese sind i.A. vor allem die unteren Hänge steil, während die oberen Hänge eher geringere Hangneigungen aufweisen (Abb. 3-3). Die Konsequenz ist, dass sowohl die flachen Bereiche in der Talsohle, als auch höher gelegene Berghänge besiedelt sind, vor allem wenn diese südexponiert orientiert sind. Die steileren Hangbereiche und die nordexponierten Hänge sind überwiegend bewaldet.

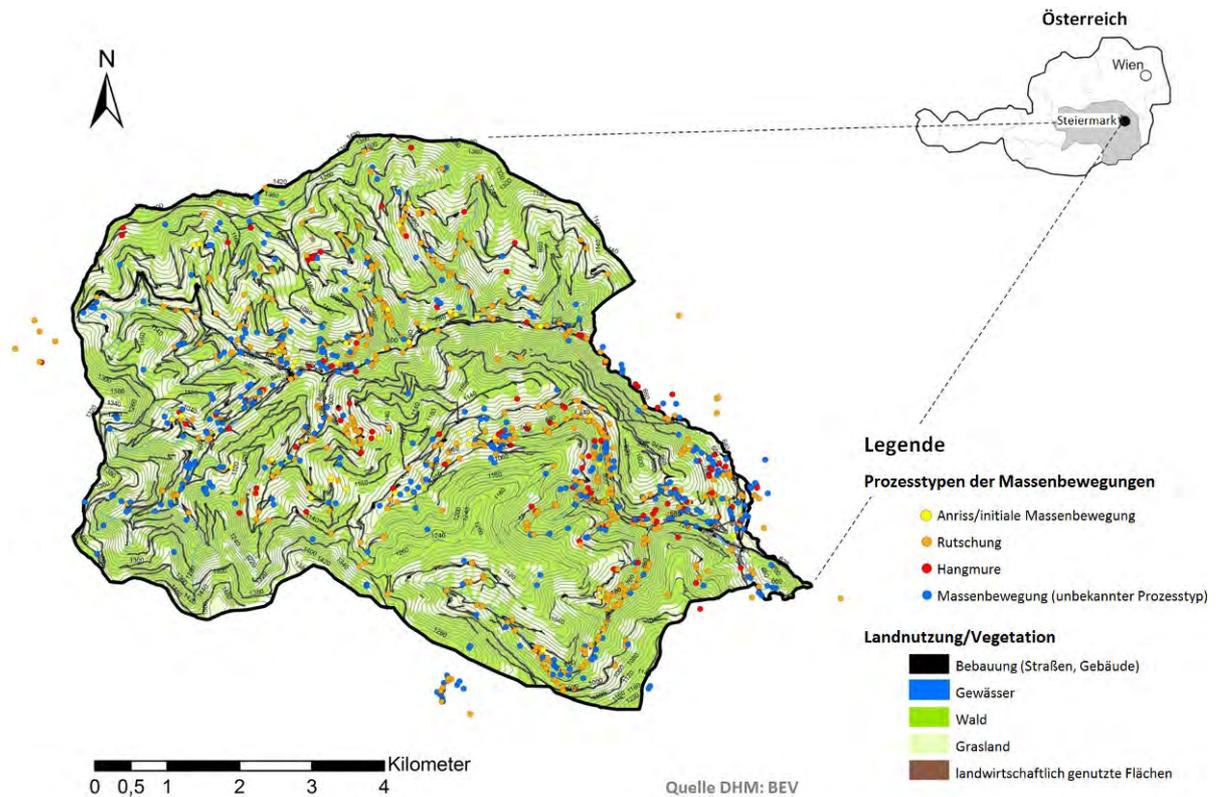


Abbildung 3-2: Geographische Lage und Landnutzung des Projektgebietes „Gasen-Haslau“ sowie das Prozesskataster der gravitativen Massenbewegungen des Ereignisses vom August 2005



Abbildung 3-3: Impressionen des Projektgebietes „Gasen-Haslau“: Blick nach Norden Richtung Gasen mit gemischter Landnutzung an den Hangflanken. Die Hangneigungen werden aufgrund der dominanten fluviatilen Erosion an den unteren Hangbereichen steiler. Fotoquelle: Fotoarchiv der GBA

Das Projektgebiet befindet sich im Ausstrichbereich der Mittleren und Unteren Deckengruppe des oberostalpinen Grazer Paläozoikums. Es wird in weiten Bereichen durch phyllitische Glimmerschiefer der Exenberg-Serie und Phyllite (Passailer und Heilbrunner Phyllit) geprägt. Diese werden überwiegend von mehr oder weniger verlehnten sandigen Schluffen bis schluffigen Sanden mit wechselnden Steinanteilen als Verwitterungsbildungen überlagert. Ganz im Westen des Gebietes dominieren vor allem Karbonatgesteine mit auflagernden mergeligen Böden. In untergeordneten Flächenanteilen kommen im Gebiet auch Schwarzschiefer der devonischen Arzberger Schichten und unterostalpine Orthogneise des Raabalpenkristallins vor (siehe Abb. 3-4). Während aus dem Schwarzschiefer überwiegend (stark) verlehnte, in Hangmulden vergleyte Lockergesteine hervorgehen, sind jene im Bereich der Gneise überwiegend sandig-grusig.

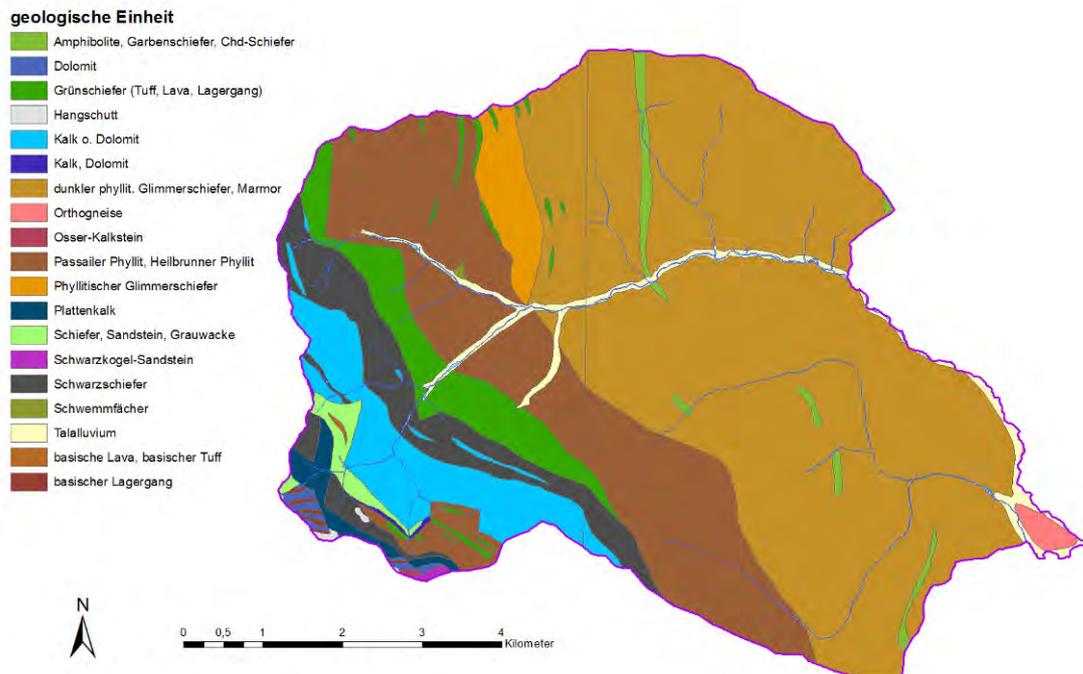


Abbildung 3-4: Geologische Karte 1:50.000 von Gasen-Haslau

3.1 Typen gravitativer Massenbewegungen

Abgesehen von wenigen Ausnahmen handelte es sich bei den stattgefundenen gravitativen Massenbewegungen um spontane Prozesse im Lockergestein. In den basalen Abrissbereichen war zumeist das relativ unverwitterte Festgestein oder der darüber liegende CV-Horizont aufgeschlossen. Manchmal waren diese Horizonte durch nachstürzendes oder –rutschendes Material der steilen Abrisskante maskiert/überdeckt. Je nach der Mächtigkeit und der Beschaffenheit des Lockergesteinsprofils waren die Gesteinsmassen rotationsartig (eher mächtigere Bodenprofile) oder translational (eher flachgründige Bodenprofile) aus dem Gesteinsverband heraus bewegt worden (Abb. 3-5).

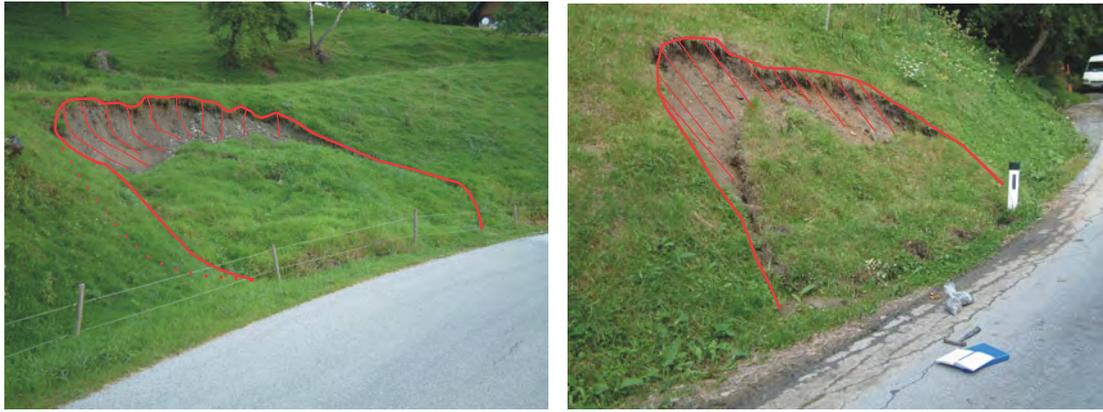


Abbildung 3-5: Beispiele für gravitative Massenbewegungen im Lockergestein in der Region „Gasen-Haslau“: Flachgründige Rotationsrutschung mit gebogener, konkaver Gleitfläche (links) und flachgründige Translationsrutschung mit ebener Gleitfläche (rechts). Fotoquelle: Fotoarchiv der GBA

Aufgrund räumlicher Analogien hat sich im Laufe der Geländeaufnahmen sehr bald herauskristallisiert, dass die meisten spontanen Massenbewegungen eigentlich nur einem dominanten initialen Prozesstyp (Anriss, Massenbewegungstyp 1) zuzuordnen sind. Aus diesem entwickelten sich dann sekundär, je nach Standortbedingungen (z.B. Substrat, Hanghydrologie) unterschiedliche dominante Prozesstypen. Einerseits handelte es sich dabei um Lockergesteinsrutschungen, durch die das transportierte Gesteinsmaterial im Nahbereich des Abrissbereiches akkumulierte (Massenbewegungstyp 2). Andererseits gingen die Lockergesteinsrutschungen aber auch in Hangmuren über, durch die das ursprüngliche Rutschmaterial fließend und beschleunigt talwärts transportiert wurde (Massenbewegungstyp 3). Je nach Rauigkeit, Länge und Neigung des talwärtigen Hanges variieren die Materialgeschwindigkeiten und Reichweiten. Vor allem an steilen und „glatten“ Hängen konnten Hangmuren große Reichweiten (Abb. 3-6, links) und Geschwindigkeiten erzielen. Entsprechend hoch waren auch gelegentlich die Zerstörungen aufgrund selbst kleiner Massen (Abb. 3-6, rechts).



Abbildung 3-6: Kleiner Herkunftsbereich und sehr langer Transport- bzw. Akkumulationsbereich einer Hangmure (links) sowie der resultierende Zerstörung. Fotoquelle: Fotoarchiv der Gemeinde

In untergeordneter Anzahl traten auch spontane, hauptsächlich hydrostatisch bedingte „Hangexplosionen“ auf, deren Abrissbereiche im Zentrum kraterähnlich vertieft sind und unregelmäßige Gestalt und Oberfläche aufweisen (Abb. 3-7). Das heraus gelöste Material floss infolge des hohen Wassergehalts und geringer

Konsistenz direkt als Hangmure beschleunigt ab. Demzufolge würde es sich dabei um Prozessräume handeln, in denen sich ohne vorherige Erkennungsmerkmale und Prozesshinweise spontan Hangmuren bildeten. Naturgemäß sind aber die Prozesse innerhalb eines Prozessraumes häufig derartig vielfältig, komplex und zeitlich variabel, so dass die kartierbaren Phänomene, Stummen Zeugen und Indizien oft nicht eindeutig interpretiert werden können.



Abbildung 3-7: Krater-ähnlicher Abrissbereich einer Hangmure, verursacht durch rasches Anwachsen des Porenwasserdrucks („Hangexplosion“). Fotoquelle: Fotoarchiv der GBA

4 Datengrundlagen

4.1 Prozessdaten

Die Region Gasen-Haslau wurde u. a. deshalb als Projektgebiet ausgewählt, da für dieses Gebiet eine umfangreiche Dokumentation von über 770 Massenbewegungen des Ereignisses 2005 besteht. Bereits kurz nach den Ereignissen im August 2005 wurden seitens des Krisenstabes und mehrerer Institutionen (BFW, GBA, Technisches Büro Geolith, WLV, Land Steiermark) unterschiedlicher Fachdisziplinen eine Vielzahl von Indizien und Informationen zu den aktuellen gravitativen Massenbewegungen per Felderkundung zusammengetragen. Später wurden auch Archivrecherchen (GBA) durchgeführt und Luftbilder aktuellen und älteren Datums (1996, 2003) ausgewertet (Joanneum Research). Letzteres ist sehr wichtig, da so ein vom Ereignis unabhängiges, eher objektiviertes Gesamtbild hinsichtlich der Verteilung der Prozesse, der signifikanten Prozessstypen und der besonders prozessdisponierenden Standortfaktoren entsteht.

Sämtliche recherchierten Dokumente sowie die im Gelände und per Fernerkundung erhobenen Informationen wurden im Rahmen des Projektes FloodRisk II (Tilch et al. 2009) digital aufbereitet. Zwecks Vermeidung redundanter Informationen und Erhöhung der Datenqualität wurden sämtliche GIS-Daten abgeglichen, indem die jeweils inhaltlich und/oder qualitativ besten Detailinformationen zu einem Datensatz kompiliert wurden. Basierend auf den so kompilierten Daten wurden anschließend für weiterführende Raumplanungsvorhaben unterschiedliche digitale Kartenprodukte verschiedener Maßstäbe erstellt, z.B.

- digitaler Prozesskataster, 10,000 (Abb. 3-2)
- digitale thematische Inventarkarte, 1:5,000 (Abb. 4.1-1)

Die digitale thematische Inventarkarte, welche auf zeitnah aufgenommenen Luftbildern und Geländeerhebungen basiert, liefert Informationen zu den betroffenen Prozessräumen (vgl. Abb. 4.1-1). Sie stellt somit eine wichtige Grundlage für durchzuführende Prozessraummodellierungen dar, während für Modellierungen von Rutschungsdispositionskarten die Daten des Prozesskatasters von Bedeutung sind.

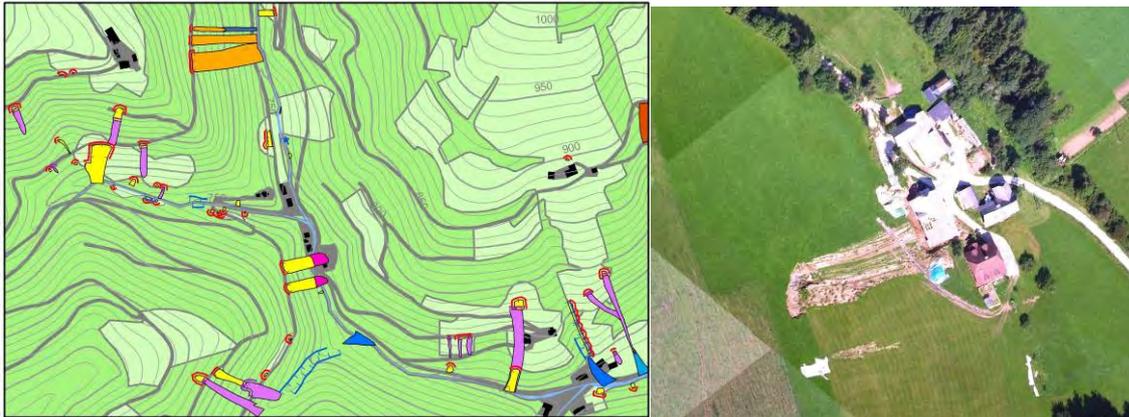


Abbildung 4.1-1: Thematische Inventarkarte mit Informationen über Prozess-Teilgebiete (links, Tilch et al. 2009) und Luftbildaufnahme (rechts, Datenquelle: Joanneum Research)

All diese Daten und Karten lagen bereits zu Beginn des Projektes AdaptSlide digital vor, wobei der zur Verfügung stehende Prozessdatensatz aufgrund verschiedener Datenquellen, Erhebungsmethoden und Zielsetzungen hinsichtlich der Datenqualität und der Inhalte sehr heterogen war. Deshalb war es erforderlich den gesamthaften Prozessdatensatz in Datenchargen unterschiedlicher Relevanz für verschiedene Zielsetzungen im Rahmen der Modellierung und unterschiedlicher Datenqualität (Inhalt, Verortung etc.) zu zerlegen. Hierbei wurden die Daten hinsichtlich folgender sichere/unsichere Informationen analysiert:

- a. geographische Verortung
- b. allgemeine Prozessinformation (gravitative Massenbewegung)
- c. Prozessart (spontane gravitative Massenbewegung im Lockergestein)
- d. unterschiedliche Prozessauslöser
- e. Ereignisdatum
- f. Attributierung von realen, kartierten Standortfaktoren

Um die Extraktion verschiedener Datenchargen unterschiedlicher Datenqualität nachvollziehbar vorzunehmen, wurde ein hierarchisches Extraktionsverfahren entwickelt und angewendet (Abb. 4.1-2). Im Zuge dessen wurden die oben angeführten Kriterien (a – f) für eine schrittweise Extraktion von Datenchargen unterschiedlicher Qualität und Anwendungsmöglichkeit herangezogen. Auf diese Weise reduzierte sich der für Modellierungen der Prozessdisposition zur Verfügung stehende Datensatz von ursprünglich ca. 770 auf nunmehr 413 Prozessdaten hoher Qualität (Tab. 4.1-1).

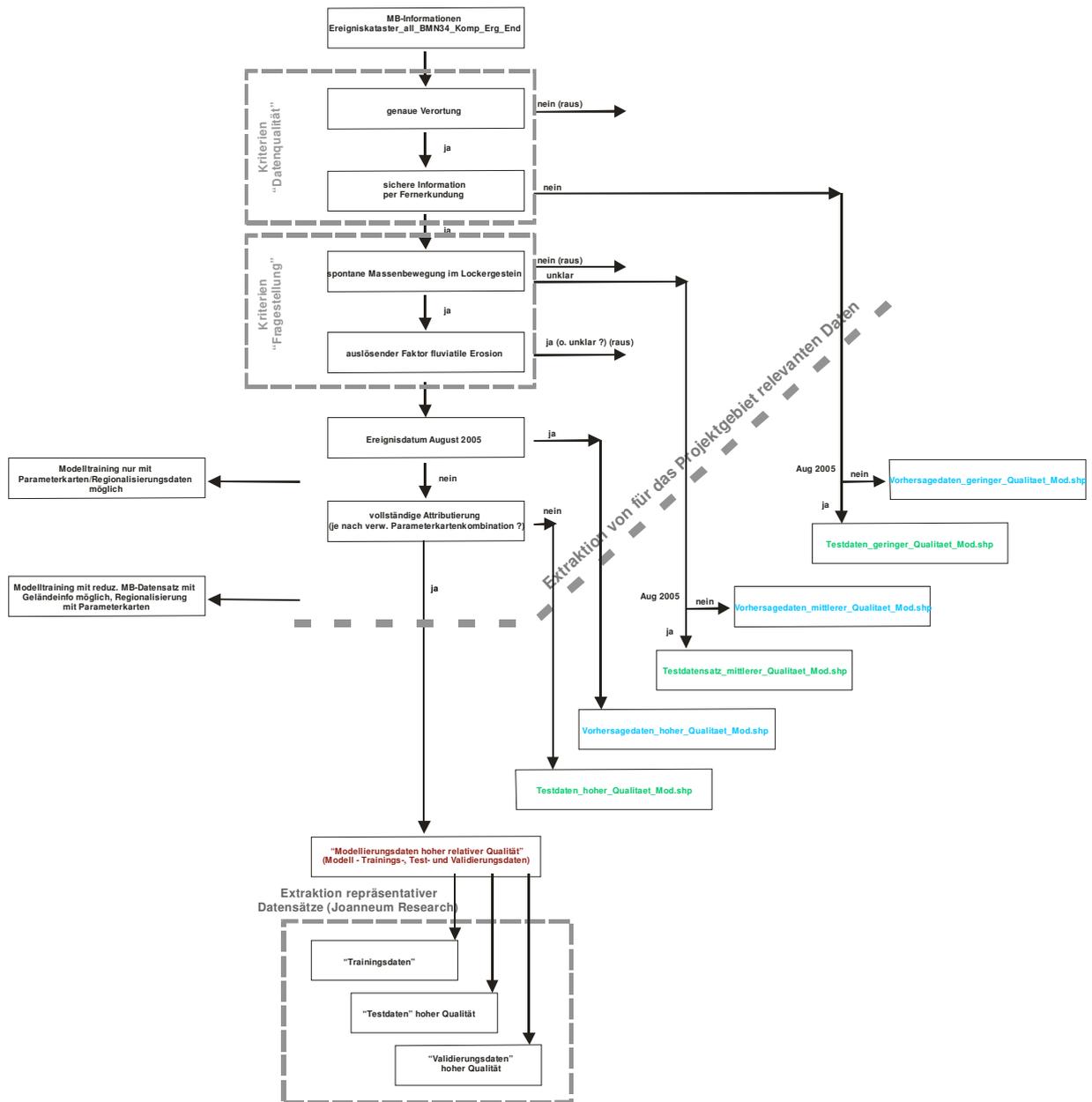


Abbildung 4.1-2: Schema für schrittweise Extraktion von Datenchargen unterschiedlicher Qualität

Tabelle 4.1-1: Extrahierte Datenchargen des projektspezifischen Modellierungsgebietes

	Dateiname in Abbildung 4.1-2	Anzahl der Punkte
Vorhersagedaten geringer Qualität	Vorhersagedaten_geringer_Qualitaet_Mod.shp	112
Vorhersagedaten mittlerer Qualität	Vorhersagedaten_mittlerer_Qualitaet_Mod.shp	57
Vorhersagedaten hoher Qualität	Vorhersagedaten_hoher_Qualitaet_Mod.shp	34
Testdaten geringer Qualität	Testdaten_geringer_Qualitaet_Mod.shp	92
Testdaten mittlerer Qualität	Testdaten_mittlerer_Qualitaet_Mod.shp	39
Testdaten hoher Qualität	Testdaten_hoher_Qualitaet_Mod.shp	12
Finaler Modellierungsdatensatz	Modellierungsdaten hoher relativer Qualität	413

4.2 Parameterkarten

An allgemein verfügbaren Flächeninformationen standen ein Digitales Höhenmodell (DHM) mit einer Auflösung von 10 m und die digitale Katastralmappe zu Verfügung, aus denen mit geringem Aufwand Informationen zum Wegenetz und zu Waldflächen sowie geomorphologische Kennwerte wie z.B. die Fließakkumulation abgeleitet werden konnten.

Darüber hinaus wurden folgende prozessorientierte Unterlagen erstellt, mit dem Ziel die Ergebnisqualität der Modellierungen zu erhöhen. Ausführliche Informationen zu den entsprechenden methodischen Ansätzen sind im umfangreichen englischsprachigen Projektendbericht enthalten, im Folgenden wird eine kurze Übersicht der generierten Unterlagen gegeben.

4.3 Geologische Konzeptkarte (Substrat-Konzeptkarte)

Die allgemein verfügbare digitale Geologische Karte (Maßstab 1:50.000) ist nur bedingt für die projektspezifischen Frage- und Problemstellungen geeignet, da diese nur partiell Informationen zur prozessrelevanten lockeren Geosphäre liefert. Deshalb wurde für das Projektgebiet eine flächendeckende Substrat-Konzeptkarte erstellt, die möglichst flächendetailliert und realistisch Informationen zur prozessrelevanten lockeren Geosphäre liefert.

Hierfür wurde eine Methode angewendet, die seitens der Geologischen Bundesanstalt entwickelt und in diversen unterschiedlich beschaffenen Landschaftsräumen erfolgreich umgesetzt wurde (Tilch & Schwarz 2010). Ausgehend von der verfügbaren Geologischen Karte handelt sich dabei um eine 3-stufige oder erweiterte, 5-stufige, einfache Verfahrensweise (Abb. 4.3-1), welche überall angewendet werden kann, sofern eine flächendeckende Geologische Karte vorliegt.

Auf der Basis der Substrat-Konzeptkarten lassen sich geologische Grunddispositionskarten für verschiedene gefahrenrelevante Prozessgruppen (hydrologische Prozesse und spontane Massenbewegungen) ableiten (Abb. 4.3-2). So fand einerseits die Parameterkarte *geologische Grunddispositionskarte bezüglich spontaner Massenbewegungen* direkt Eingang in die Modellierung der Rutschungsdisposition. Andererseits stellte die *Grunddispositionskarte für hydrologische Prozesse* wiederum einen wichtigen Eingangsdatensatz zur Erstellung der Parameterkarte zur flächendeckenden *Abflussdisposition* dar.

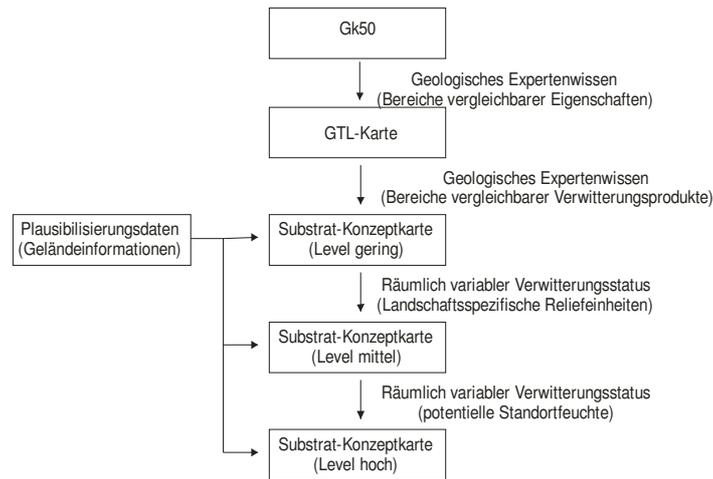


Abbildung 4.3-1: Verfahrensweise zur Erstellung von Substrat-Konzeptkarten verschiedener Bearbeitungs-/Qualitätslevel

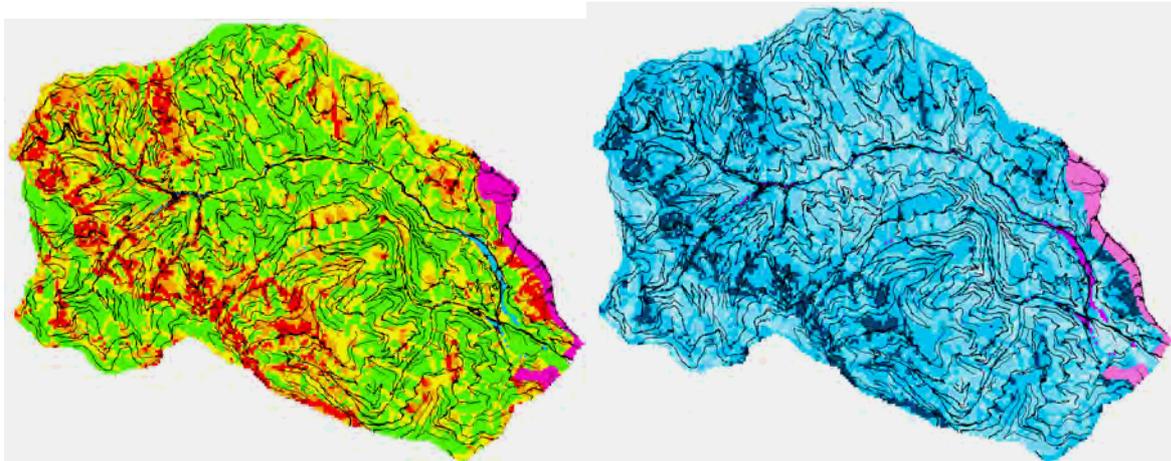


Abbildung 4.3-2: Grunddispositionskarten basierend auf der Substrat-Konzeptkarte „Level hoch“ für verschiedene Prozessgruppen (spontane Massenbewegungen im Lockergestein (links) und Oberflächenabfluss (rechts))

4.4 Bodenkarte auf Basis eBod und Forstlicher Standortkartierung

Bundesweit sind in der eBod (digitale Bodenkarte für Österreich) Bodeninformationen für landwirtschaftlich genutzte Flächen verfügbar. Zusätzlich gab es für das Gebiet auch eine forstliche Standortkartierung in welcher ebenfalls Bodeninformationen enthalten sind. Da für die Modellierung der Rutschungsdisposition flächendeckende Daten benötigt werden, wurde versucht die in den unterschiedlichen Unterlagen verfügbaren Informationen zusammenzuführen und daraus eine einheitliche, flächendeckende Bodenkarte (Abb. 4.4-1) zu erstellen. Dabei kommt es natürlich zu Informationsverlusten, da der Informationsgehalt bezüglich der Bodeneigenschaften in der forstlichen Standortkartierung vergleichsweise geringer ist. So finden sich z.B. keine direkten Informationen zu rutschungsrelevanten bodenphysikalischen Kennwerten. Für Flächen die von den Polygonen beider Karten nicht bzw. doppelt abgedeckt sind, wurden standardisierte Bearbeitungsverfahren entwickelt. Auf Basis der vereinheitlichten Bodenkarte wurde für das Testgebiet auch noch eine Rutschungsdispositionskarte generiert.

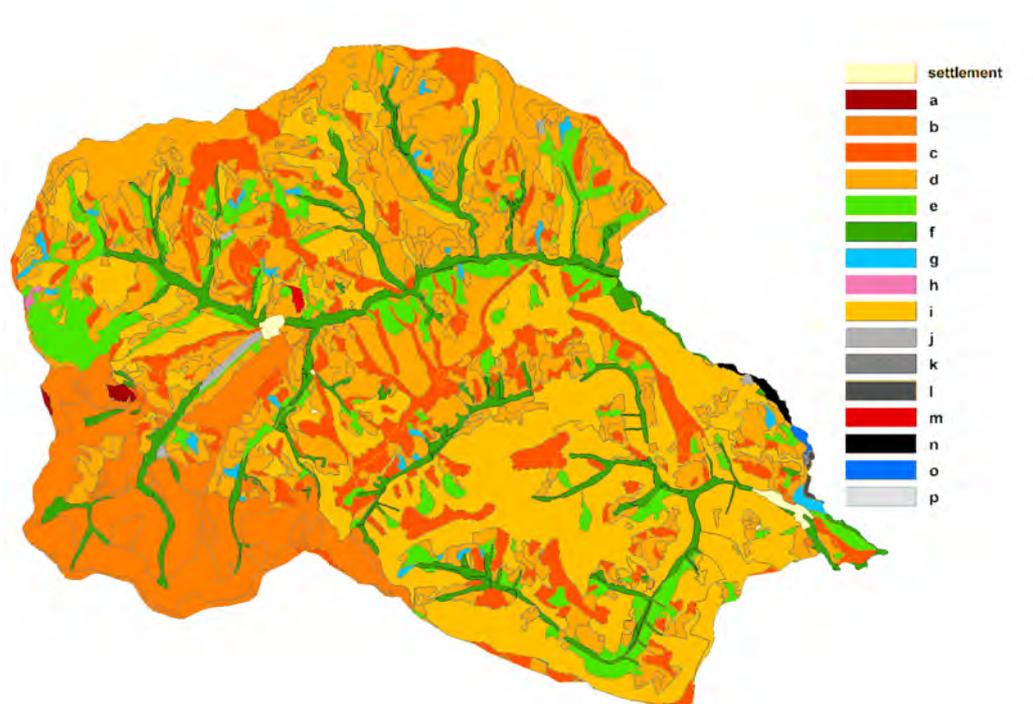


Abbildung. 4.4-1: Vereinheitlichte, flächendeckende Bodenkarte des Testgebietes

4.5 Fernerkundungsdaten

Fernerkundungsdaten können aufwendige Datenerhebungen im Gelände ergänzen und teilweise ersetzen. Im Rahmen des Projekts AdaptSlide wurden die folgenden Datengrundlagen verwendet:

- Satellitendaten
- Luftbilder (Orthofotos)
- Laserscannerdaten (LiDAR – Light Detection and Ranging)

Da die verfügbaren Landbedeckungsdaten des Untersuchungsgebiets kleinräumige Heterogenitäten der Waldbedeckung nicht mit ausreichender Genauigkeit darstellten, wurde eine Landbedeckungsklassifikation auf Basis hochauflösender Satellitendaten durchgeführt. Die verwendeten Szenen des SPOT5 Sensors (Aufnahmedatum: 30.9.2007) bzw. des ALOS Sensors (Aufnahmedatum: 15.7.2007) ermöglichten die Klassifizierung des Waldtyps (9 Klassen, vgl. Abb. 4.5-1), des Überschirmungsgrads (4 Klassen) und des Bestandesalters (4 Klassen).

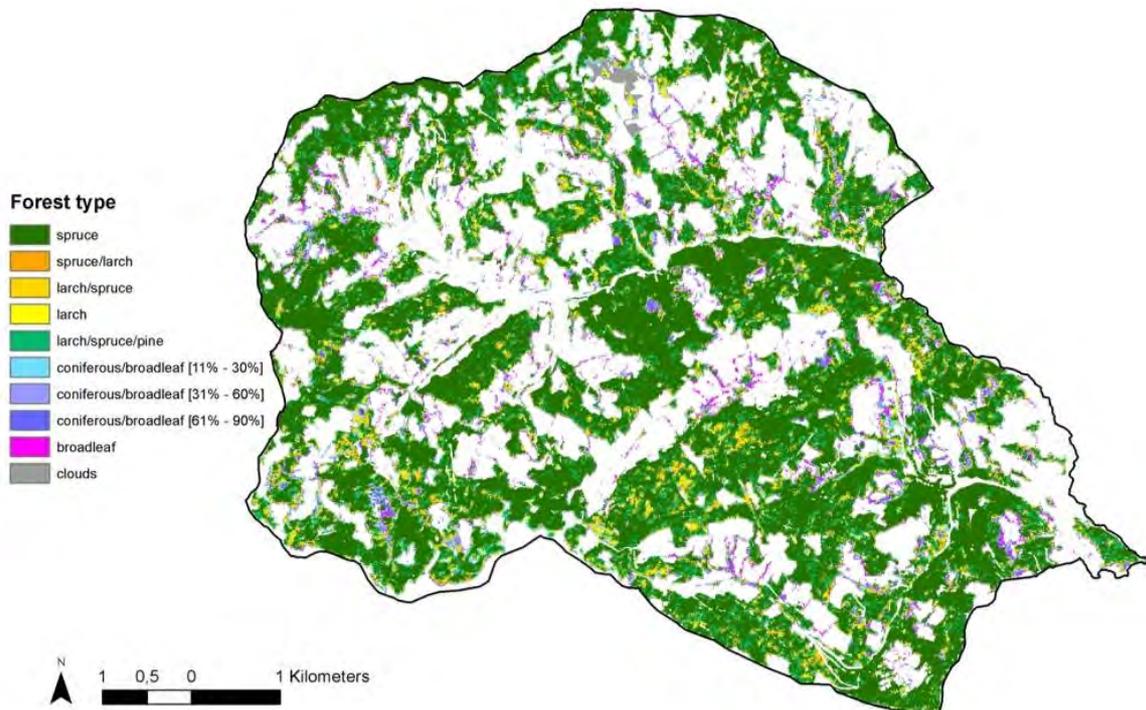


Abbildung 4.5-1: Flächendeckende Klassifikation des Waldtyps auf Basis von hoch auflösenden Satellitendaten

15 Tage nach dem Niederschlagsereignis wurden von einigen der am meisten betroffenen Flächen hochauflösende Luftbilder aufgenommen. Diese wurden visuell für die Identifizierung von Massenbewegungen ausgewertet (Abb. 4.1.1, rechts).

LiDAR Daten standen leider nur für einen Teilbereich des Untersuchungsgebiets zur Verfügung. Die Daten besitzen sowohl für die Detektion von Massenbewegungen (auch in bewaldeten Bereichen), für geomorphologische Analysen (z.B. Berechnung der Oberflächenrauigkeit) als auch für die Berechnung von Forstparametern (z.B. Baumhöhen und Bestandesdichte mittels Einzelbaumdetektion) großes Potential.

4.6 Oberflächenabflusskarten

Das Wasserdargebot im ungesättigten Bereich der lockeren Geosphäre spielt bei der Auslösung besonders von spontanen Rutschungen eine wesentliche Rolle.

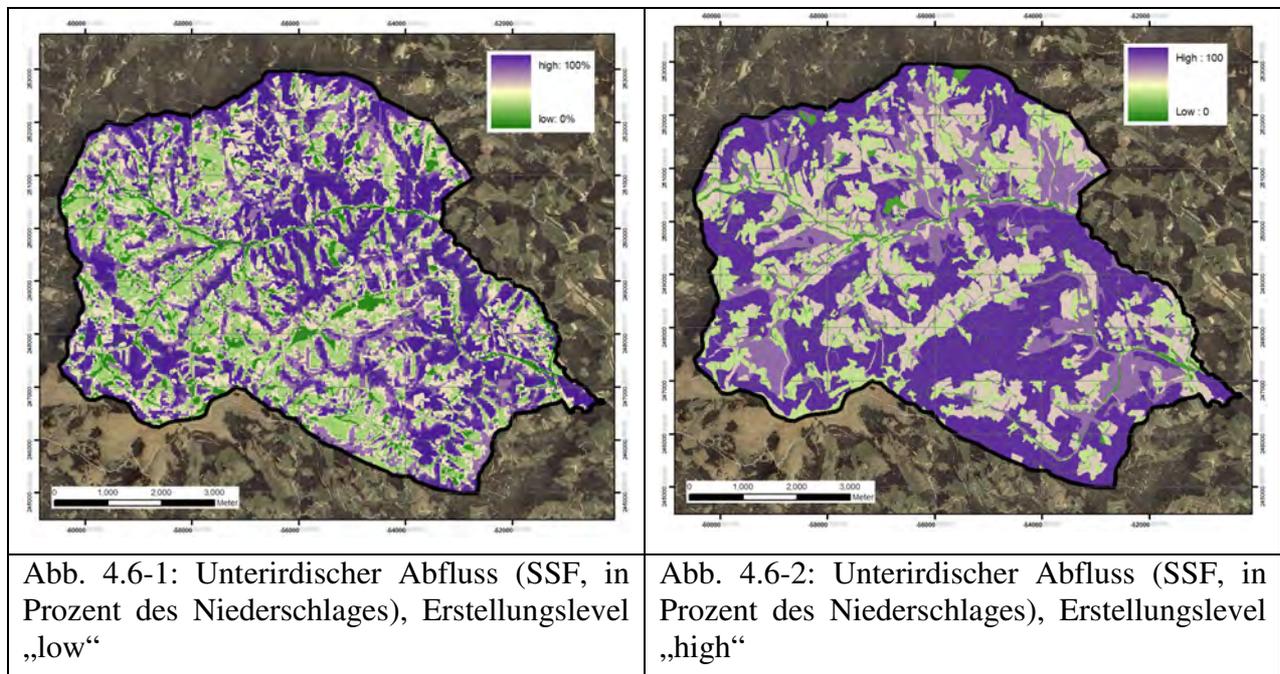
Rund 800 Starkregenexperimente im Ostalpenraum sowie in Bayern belegen, dass über eine kombinierten Bewertung des Bio-, Geo- und Hydrokomplexes das oberflächlich bzw. oberflächennahe (bis 5 cm Tiefe) abfließende Wasser aus Starkregenereignissen abschätzbar ist. Um die komplexen, naturräumlichen Zusammenhänge für die Praxis anwendbar darzustellen, haben Markart et al. (2004) eine Kartieranleitung zur Abschätzung des Oberflächenabflusses im Gelände erstellt. Alternativ wurden Methoden entwickelt, welche eine Abschätzung der Oberflächenabflussdisposition auf Basis vorliegender Datengrundlagen erlauben (Klebinder et al. 2008).

Als Oberflächenabflussbeiwert Ψ ist jener Anteil des Niederschlages definiert, der oberflächlich bei konstanten Abflussverhältnissen auftritt. Um das Wasser im

Untergrund zu quantifizieren wurde eine Subsurfaceflow (SSF) Karte erstellt die den Teil des in den Untergrund gelangenden Wassers ($SSF = 1 - \Psi$) darstellt. Die SSF-Karte (alleine sowie als Produkt aus SSF und Niederschlag) diene in weiterer Folge als Gewichtung in der Berechnung der Flowaccumulation.

Die SSF-Karte wurde in zwei unterschiedlichen Bearbeitungsstandards erstellt:

- 1) Die „Low Level“ Karte (Abb. 4.6-1) wurde mit mäßigem Aufwand erstellt, wobei Parameterkarten für den Untergrund und Landnutzung/Vegetation über eine Bewertungsmatrix kombiniert wurden. Als Datengrundlage für den Untergrund wurden die Konzeptkarten sowie die Bodenkarte herangezogen. Über reliefbedingte Faktoren (Flowaccumulation, Strahlungsverhältnisse) wurden weitere Modifikationen durchgeführt.
- 2) Die aufwändiger erstellte High Level Karte (Abb. 4.6-2) wurde auf Basis einer flächendeckenden Feldkartierung nach der Geländeanleitung (Markart et al. 2004) erstellt.



4.7 Niederschlagskarten (INCA)

Neben der Neuberechnung der Niederschlagsverteilung im Ereignis 2005 unter Einbeziehung zusätzlicher HZB-Stationen wurden auch die Unsicherheiten räumlich differenziert mittels „künstlicher“ Ensembles abgeschätzt (vgl. Abb. 4.7-1). Die Niederschlagsanalysen wurden mittels INCA, einer nichtlinearen Kombination von Radar- und Messstationsdaten (Haiden et al. 2009) durchgeführt. Die erstellten Ensemble-Niederschlagsanalysen zeigten die zunehmende (große) Bedeutung von zusätzlichen Stationsinformationen mit steigenden Niederschlagsgradienten für die Ergebnisqualität.

Tests mit geänderter Radarskalierung ergaben, dass die operationell verwendete Skalierung zwar die besten Mittelwerte liefert, zur Darstellung von Extremfällen aber manchmal weniger geeignet ist. Es ist daher die grundlegende Entscheidung zu treffen, ob man im Mittel die besten Ergebnisse erzielen oder Extremfälle am Besten abbilden möchte.

Die Rahmenbedingungen für den Einsatz des INCA Modells waren bei dem Ereignis ausgesprochen ungünstig, da eine niedrige Wolkendecke (mit entsprechend negativen Auswirkungen auf die Radarsicht) mit einer hohen Variabilität der Niederschlagsintensitäten zusammentraf, die aber von den Messstationen nicht abgebildet werden konnte. Dadurch ist die Ergebnisqualität der INCA-Niederschlagsanalysen des Niederschlagsereignisses von 20 - 22.8.2005 von vergleichsweise geringer Qualität bzw. mit hohen Unsicherheiten behaftet.

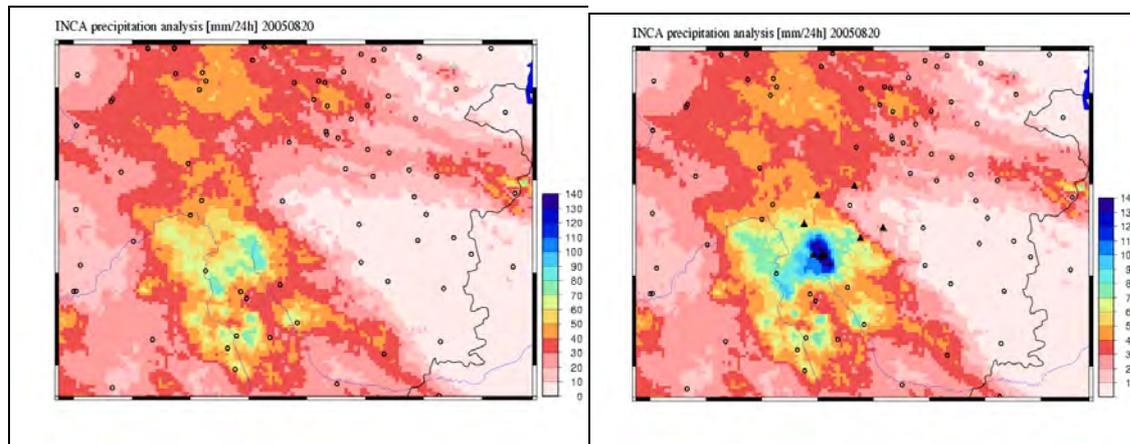


Abbildung 4.7-1: Vergleich der INCA Niederschlagsanalyse (20.8.2005, 6:00 – 21.8.2011, 6:00) ohne (links) und mit (rechts) HZB Stationen (Dreiecke). Kreise: ZAMG-Stationen

5 Datenmanagement

Die verfügbaren Prozessdaten für die Modellentwicklung und –validierung weisen aufgrund ihrer unterschiedlichen Herkunft (Archivdaten, Fernerkundung, Geländedaten) große Unterschiede im Hinblick auf ihre Qualität und ihre fachliche Aussagekraft auf. Daher wurde mittels einer hierarchischen Extraktionsmethode eine Aufteilung in unterschiedliche Datenchargen vorgenommen. Von den ursprünglich 770 erfassten Massenbewegungspunkten blieben letztendlich 413 Punkte für die Modellentwicklung und –validierung übrig. Dieser Datensatz wurde anschließend in drei repräsentative Teildatensätze aufgeteilt: Trainingsdaten (40%), Validierungsdaten (30%) und Testdaten (30%), vgl. Abb. 5-1.

Data splitting

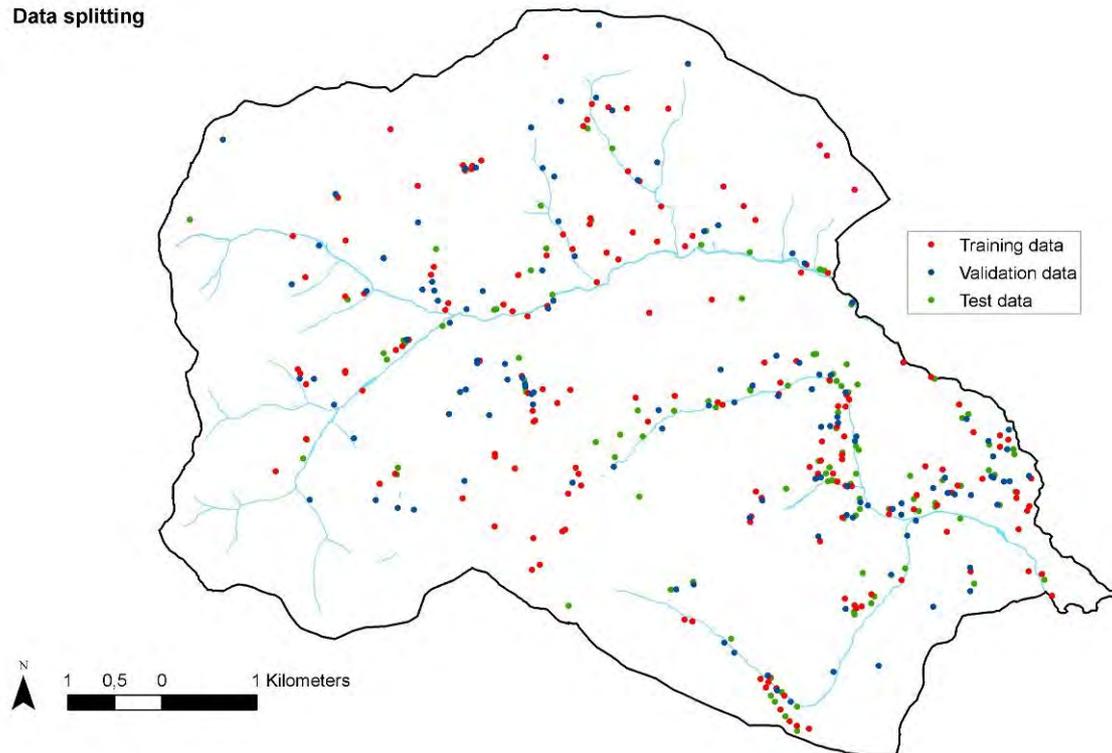


Abbildung 5-1: Verteilung der Trainings-, Validierungs- und Testdaten der Massenbewegungspunkte

Die als Karten zur Verfügung stehenden bzw. neu generierten Umgebungsparameter wurden mittels bivariater Statistik zur Identifizierung jener Parameter mit hoher Korrelation zu Massenbewegungen analysiert. Auch Korrelationsmaße zwischen den einzelnen Parameterkarten wurden berechnet. Parameter mit hohen Interkorrelationen wurden nicht gleichzeitig in einem Modellierungsdurchgang eingesetzt.

Die generelle Strategie der schrittweisen Einbeziehung von Umgebungsparametern in der statistischen Modellierung wurde folgendermaßen festgelegt:

1. Zunächst Berücksichtigung der “Level gering” Parameter, gefolgt von “Level hoch”.
2. Variablen mit hoher Korrelation zur Rutschungsverteilung werden zuerst integriert.
3. Die Variablenanzahl wird nacheinander um jeweils einen Parameter erhöht. Wenn zwei oder mehr Variablen gleiche Validierungsergebnisse zeigen, werden alle diese Varianten getestet. Die Modellierung wird mit jener Variablen fortgesetzt, welche die besten Validierungsergebnisse zeigt.
4. Die besten “Level gering” und “Level hoch” Ergebnisse werden auf Basis der Validierungsergebnisse bestimmt. Einzelne Parameterkarten werden durch andere Parameter ersetzt, da unterschiedliche Parameterkombinationen in unterschiedlichem Ausmaß das Ergebnis beeinflussen können.
5. Die besten “Level gering” und “Level hoch” Ergebnisse werden mit den Regionalisierungsdaten neu berechnet.

6 Methoden zur Bestimmung und Bewertung der Rutschungsdisposition

6.1 Modellierungsstrategie und -methodik

Abbildung 6.1-1 zeigt das Modellierungsschema für die Erstellung von Dispositionskarten generell und für das Projekt AdaptSlide im Besonderen: Als Inputdaten dienen einerseits die Prozessdaten und andererseits die Parameterkarten der Geofaktoren. Zwischen diesen Datensätzen werden mittels unterschiedlicher Modellierungsmethoden Zusammenhänge errechnet, aus denen sich die Rutschungsdisposition als Output ableitet. Hierbei werden Ergebnisse aus verschiedenen Parameterkartenkombinationen gerechnet, wobei über deren Validierung versucht wird, die besten und aussagekräftigsten Parameterkarten zu eruiieren. Im Rahmen des Projekts AdaptSlide wurden nun folgende Teilbereiche (Abb. 6.1-1) im Modellierungsschema genauer analysiert und optimiert, wobei verschiedene Varianten und Methoden verglichen und bewertet wurden:

- Geofaktoren: verfügbare Daten (Ia), Prozessorientierte Parameterkarten (Ib)
- Prozessdaten (II)
- Modellierungsmethoden (III)
- Validierungsmethoden (IV)
- Ergebnisse (V)

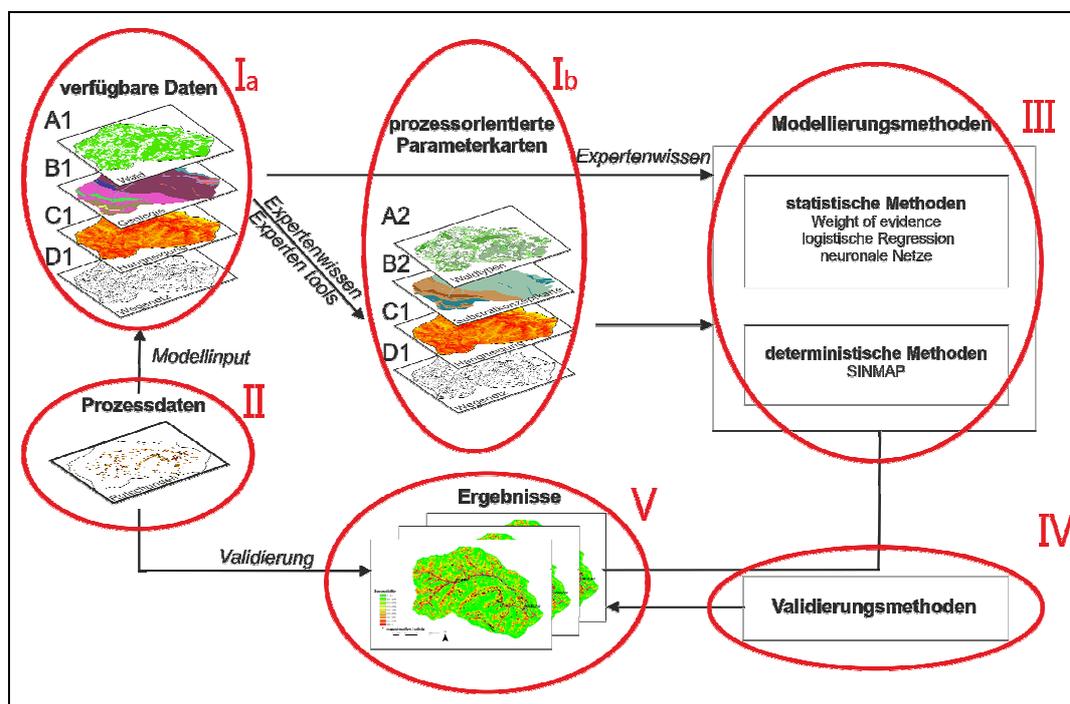


Abbildung 6.1-1: Modellierungsschema von Dispositionskarten im Rahmen von AdaptSlide

Die erste Phase der Modellierung erfolgte mit standardmäßig aufbereiteten allgemein verfügbaren Daten (Ia = „Level gering“-Parameterkarten). In der zweiten Phase wurden hingegen verbesserte, prozessorientierte Parameterkarten (Ib = „Level hoch“-Parameterkarten) herangezogen, die mit höher entwickelten Methoden aufgrund von Expertenwissen und somit höherem Aufwand erstellt wurden. Es kamen sowohl

verschiedene Modellierungsmethoden (III), als auch verschiedene Validierungsmethoden (IV, s.u.) zum Einsatz. So wurden die statistischen Modellierungsmethoden neuronale Netze, logistische Regression und Weight of Evidence sowie die deterministische SINMAP-Methode angewandt. Da neuronale Netze und logistische Regression die besten Ergebnisse (V) generierten, wurden die Ergebnisse dieser beiden Methoden einer genaueren vergleichenden Analyse und Validierung unterzogen.

6.2 Angewandte Validierungsmethoden

Um die zentrale Frage des AdaptSlide Projekts „welche Modellierungsmethode und Parameterkarte/Parameterkartenkombination bringen welche Verbesserung für die Rutschungsdispositions-karte?“ zufriedenstellend beantworten zu können, werden geeignete Validierungsmethoden (IV) benötigt, mit deren Hilfe die einzelnen Ergebnisse erst aussagekräftig miteinander verglichen werden können. Da alle international üblichen Validierungsmethoden ihre Vor- und Nachteile besitzen und nur vereinfachende, gebietsintegrale Validierungen erlauben, wurden für das Projekt AdaptSlide mehrere verschiedene Validierungsmethoden herangezogen. Hierbei wurde von der GBA noch zusätzlich eine eigene, neue Validierungsmethode entwickelt und erfolgreich angewandt. Folgende Validierungsmethoden wurden nun für die Ergebnisvalidierung des Projekts herangezogen und (im Falle der neuronalen Netze über eine von der GBA eigens entwickelte hierarchische Validierungsstrategie) miteinander verknüpft:

- a) Validierung nach Chung & Fabbri (2003)
- b) Receiver Operating Characteristic (ROC)
- c) GBA-Methode
- d) Erkenntnisrate (= Sensitivity)
- e) Massenbewegungsverteilung über die Dispositionsklassen

Validierungsmethode nach Chung & Fabbri (2003)

Für diese am häufigsten angewandte Methode werden alle Pixel des Ergebnisses (=Dispositions-karte) nach der Höhe der Disposition absteigend entlang der x-Achse sortiert. Die y-Achse gibt den aufsummierten Prozentsatz der kartierten Massenbewegungen an, die in der jeweiligen Dispositionsklasse liegen. Die Steigung der so erhaltenen Kurve kann als standardisierte Massenbewegungs-dichte innerhalb einer bestimmten Dispositionsklasse aufgefasst werden. Für niedrige Dispositionswerte sind daher geringe, für hohe Dispositionswerte große Steigungen anzustreben. Ein Ergebnis ist umso besser, je weiter die Kurve links oben liegt. Anstatt der Kurve kann vereinfachend auch die *Area under the curve* (=AUC) als Validierungsmaß angegeben werden (Beispiel: siehe Ergebnisse der Modellierung).

7 Ergebnisse der Modellierungen mit neuronalen Netzen und logistischer Regression sowie deren Bewertung

Es wurde untersucht, wie sich unterschiedliche Parameterkarten, mithilfe derer die zeitlich-räumlichen variablen Standortverhältnisse und -eigenschaften beschrieben werden, auf die mittels unterschiedlicher Methoden modellierten Dispositionskarten für spontane, flachgründige Rutschungen und Hangmuren auswirken. Hierbei wurde einerseits analysiert, welche Verbesserungen durch die Integration einer Parameterkarte in die Modellierung im Vergleich zur Nicht-Verwendung dieser Karte hervorgerufen werden. Andererseits wurde das Verbesserungspotential untersucht, welches „Level hoch“-Parameterkarten (Ib, s.o.) gegenüber „Level gering“-Parameterkarten (Ia, s.o.), aufweisen. Darüber hinaus wurden auch Durchläufe mit Kombinationen von jenen Parameterkarten durchgeführt, welche aufgrund des Expertenwissens der Autoren das Kriterium „prozessorientiert“ am besten erfüllen (= Parameterkarten mit höchster Prozessorientierung). Es wurde auch der Aufwand, der zur Erstellung der Parameterkarten erforderlich war, erfasst, um so Aussagen zur Kosten-Nutzen-Relation der so erzeugten Parameterkarten zu erhalten.

Für die genauer untersuchten Modellierungsmethoden neuronale Netze und logistische Regression galt, dass größere Verbesserungen der Modellgüte (=Verbesserungen in der Validierung der Ergebnisse) nur bei **Integration der Parameter Wald, Wegenetz, Vertikalwölbung** (und sicher auch der *Hangneigung*, obwohl diese nicht untersucht wurde) und eingeschränkt auch bei den verschiedenen Varianten der *Abflussdisposition* (meist bei den neuronalen Netzen, nicht aber bei der logistischen Regression) und der *Niederschlagsverteilung* (bei logistischer Regression, nicht jedoch bei den neuronalen Netzen) auftraten (vgl. Ia und Ib in Abb. 6.1-1). Die größten Unterschiede in der Validierung und somit die größten Verbesserungen der Modellgüte konnten hierbei bei der Einbeziehung des Parameters *Wald* erzielt werden. Die Integration der Parameter *Fließakkumulation, geologische Grunddisposition, Grunddisposition aufgrund der Bodenkarte, Hangklassifikation* und eingeschränkt die *Abflussdispositionen* und die *Niederschlagsverteilung*, führte bei beiden Modellierungsmethoden i.A. jedoch zu keiner Verbesserung der Ergebnisse. Mitunter bewirkten manche dieser Parameterkarten auch leichte Verbesserungen in den Ergebnissen. Da die im Projekt AdaptSlide angewandten, international üblichen Validierungsmethoden (s.o.) aus Sicht der Autoren jedoch nicht ausreichen, um eine genaue und zuverlässige Bewertung der Ergebnisgüte vorzunehmen, sondern nur als grobe Bewertungsmethoden zu verstehen sind (s.u.), wurde diesen Parameterkarten schließlich kein Verbesserungspotential zugeschrieben.

Die Analyse zum **Verbesserungspotential der verbesserten, prozessorientierten Parameterkarten („Level hoch“-Parameterkarten**, vgl. Ib in Abb. 6.1-1) ergab, dass diese Parameterkarten nur selten zur Verbesserung der Modellgüte beitragen konnten. So kam es bei fast allen „Level hoch“-Parameterkarten im Vergleich zur jeweiligen „Level gering“-Parameterkarte zu keiner Verbesserung der Modellgüte (Abb. 7-4). Verbesserungen gegenüber „Level gering“-Parameterkarten konnten nur teilweise beim „Level hoch“-*Niederschlag* (im Wesentlichen bei der logistischen Regression, nur eingeschränkt bei den neuronalen Netzen) erzielt werden. Der „Level hoch“-*Niederschlag* ist somit die einzige „Level hoch“-Parameterkarte, die irgendeine Verbesserung gebracht hat. Die ausgebliebene Verbesserung durch die „Level hoch“-Parameterkarten ist bemerkenswert und kann möglicherweise durch die unzureichenden Validierungsmethoden (vgl. Diskussion) erklärt werden.

Bei den Parametern *Wald* und *Abflussdisposition*, für welche verschiedene **Parameterkarten-Varianten** (die Variante wurden aus unterschiedlichen Eingangsdaten hergeleitet) erzeugt werden konnten, zeigte sich, dass keine dieser Varianten zu bevorzugen war, da sie alle stets zu ähnlich guten Validierungsergebnissen beitrugen (Abb. 7-4). Weiters kam es bei allen Durchläufen mit **Parameterkombinationen mit höchster Prozessorientierung** zu einer Verschlechterung der Modellgüte.

Sehr große Unterschiede in der Validierung und somit die größten Verbesserungen der Modellgüte konnten hingegen stets bei den **Parametern mit im Bereich von Massenbewegungen kartierter Landnutzungsinformation** (Wald und Wegenetz, vgl. II in Abb. 6.1-1) gegenüber den Parametern ohne kartierter Landnutzungsinformation (Abb. 7-4) erzielt werden.

Beim **Vergleich der beiden Modellierungsmethoden neuronale Netze und logistische Regression** (vgl. III in Abb. 6.1-1) zeigte sich, dass beide Methoden generell recht ähnliche Dispositionskarten erzeugen. Dies wird beim Vergleich der beiden Ergebnisse 10 (neuronales Netz, Abb. 7-1) und 14 (logistische Regression, keine Abbildung) deutlich. Beide wurden mit den gleichen Parameterkarten (*Wald, Wegenetz, Hangneigung, Vertikalwölbung, Abflussdisposition aufgrund geologischer Karte „Level gering“, geologische Grunddisposition „Level gering“*) generiert und zählen zu den besten Modellierungsergebnissen ohne der Verwendung des Parameters *Niederschlagsverteilung*. Hierbei werden hohe Rutschungsdispositionen rot und niedrige grün dargestellt. In beiden Dispositionskarten (sowie in den meisten anderen Karten dieses Projekts) treten hohe Dispositionen tendenziell an waldfreien, steileren, konkaven Hängen hoher Abflussdisposition sowie im Einflussbereich von Wegen auf.

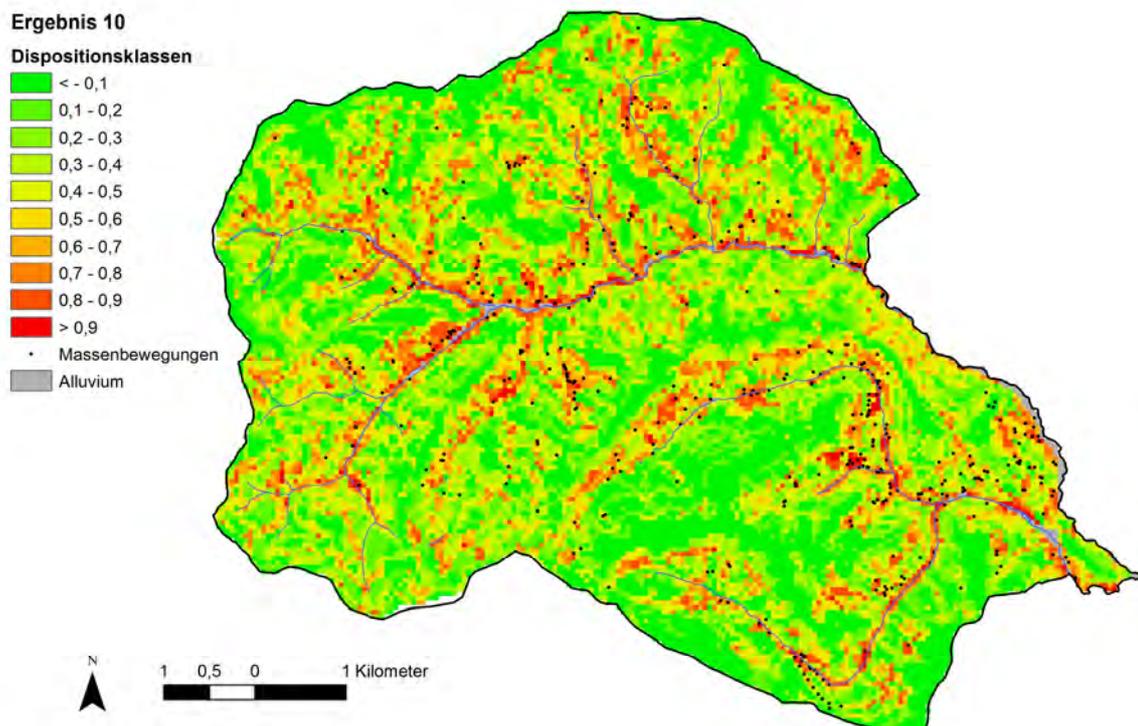


Abbildung 7-1: Rutschungsdispositionskarte Ergebnis 10 modelliert mit neuronalem Netzen

Die Differenzenkarte von Ergebnis 10 (neuronalen Netze) und 14 (logistische Regression, Abb. 7-2) zeigt nun exemplarisch für die meisten Ergebnisse einerseits die relativ geringen Differenzen der beiden mit unterschiedlichen Methoden gerechneten Dispositionskarten. Andererseits verdeutlicht sie aber auch, dass die logistische Regression meist etwas stärker zwischen hohen und niedrigen Dispositionen differenziert als die neuronalen Netze (negative Werte zeigen höhere Dispositionen der logistischen Regression, positive Werte zeigen höhere Dispositionen der neuronalen Netze an). Dass eine der beiden Methoden aus diesem Grund die Modellierung von Rutschungsdispositionskarten besser bewerkstelligen kann als die andere ist, kann daraus jedoch nicht abgeleitet werden.

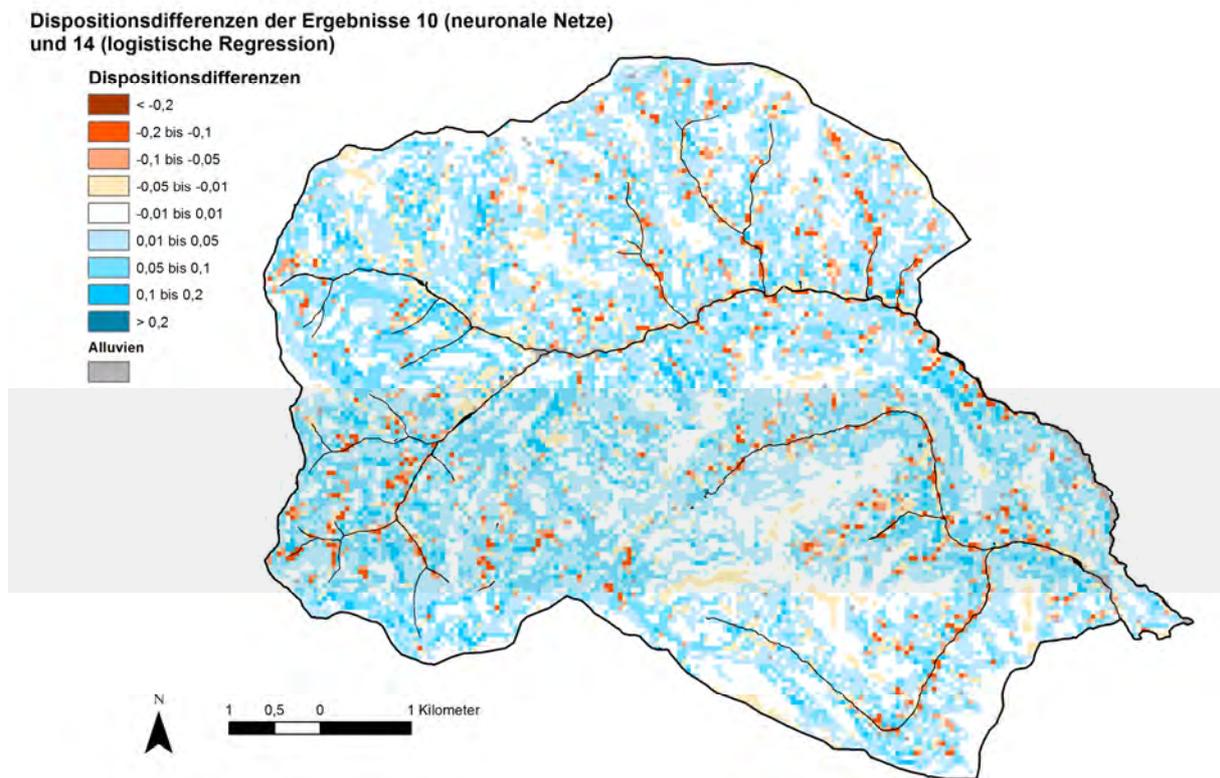


Abbildung 7-2: Differenzenkarte zweier mit gleichen Parameterkarten, aber unterschiedlicher Methode gerechneten Ergebnisse

Um die Frage zu beantworten, welche Methode imstande ist, bessere Rutschungsdispositionskarten zu erzeugen, wurden die Validierungsergebnisse der Testdaten beider Methoden gegenübergestellt. Hierbei wurden sowohl alle Ergebnisse mit gleichen Parameterkartenkombinationen als auch die jeweils besten 5 „Level gering“- bzw. „Level hoch“-Ergebnisse beider Methoden miteinander verglichen („Level gering“-Ergebnisse enthalten „Level gering“-Parameterkarten, „Level hoch“ Ergebnisse enthalten je nach Kartequalität „Level hoch“- und/oder „Level gering“-Parameterkarten). Die besten 5 Ergebnisse waren im Falle der „Level gering“-Ergebnisse in beiden Methoden die Ergebnisse mit gleicher Nummerierung und gleichen Parameterkarten (Tab. 7-1), im Falle der „Level hoch“-Ergebnisse mit unterschiedlicher Nummerierung und unterschiedlichen Parameterkarten (Tab. 7-2 & 7-3).

Es zeigte sich nun bei allen Validierungsvergleichen von logistischer Regression und neuronalen Netzen, dass die Ergebnisse beider Methoden aufgrund der verwendeten Validierungsmethoden als „gleich gut“ bis „bei den neuronalen Netzen leicht besser“ zu bezeichnen sind. Aufgrund der eingeschränkten Aussagekraft der Validierungsmethoden (vgl. Diskussion), konnte jedoch keine der beiden Modellierungsmethoden klar favorisiert werden. Generell konnten mit besten AUC-Werten um die 92 % sehr gute Ergebnisse erzielt werden (Tab. 7-1 bis 7-3).

Tabelle 7-1: Validierungsmaßzahlen (AUC) der Testdaten der besten 5 „Level gering“-Ergebnisse von logistischer Regression und neuronalen Netzen sowie deren Differenzen

Ergebnis	logistische Regression		Neuronale Netze		Differenz NN-Log Reg	
	ROC	Chung & Fabbri	ROC	Chung & Fabbri	ROC	Chung & Fabbri
5	90,80%	90,61%	91,64%	91,26%	0,84%	0,65%
6	90,70%	90,55%	91,52%	91,17%	0,82%	0,62%
14a LR, 10 NN	90,80%	90,62%	91,68%	91,34%	0,88%	0,72%
23	90,70%	90,49%	91,25%	90,87%	0,55%	0,38%
24	91,00%	90,78%	91,89%	91,53%	0,89%	0,75%

Tabelle 7-2: Validierungsmaßzahlen (AUC) der Testdaten der besten 5 „Level hoch“- Ergebnisse von logistischer Regression sowie (falls diese unter den 5 besten Ergebnissen vorhanden sind) deren Differenzen zu entsprechenden Ergebnissen der neuronalen Netze

Ergebnis	logistische Regression		Neuronale Netze		Differenz NN-Log Reg	
	ROC	Chung & Fabbri	ROC	Chung & Fabbri	ROC	Chung & Fabbri
43a LR	91,50%	91,29%	-	-	-	-
67 LR, 58 NN	92,80%	92,40%	92,82%	92,45%	0,02%	0,05%
58 LR	93,00%	92,66%	-	-	-	-
63 LR	91,40%	91,20%	-	-	-	-
66 LR	93,10%	92,74%	-	-	-	-

Tabelle 7-3: Validierungsmaßzahlen (AUC) der Testdaten der besten 5 „Level hoch“- Ergebnisse von neuronalen Netzen sowie (falls diese unter den 5 besten Ergebnissen vorhanden sind) deren Differenzen zu entsprechenden Ergebnissen der logistischen Regression

Ergebnis	logistische Regression		Neuronale Netze		Differenz NN-Log Reg	
	ROC	Chung & Fabbri	ROC	Chung & Fabbri	ROC	Chung & Fabbri
33	91,30%	91,03%	92,22%	91,83%	-	-
67 JR, 58 NN	92,80%	92,40%	92,82%	92,45%	0,02%	0,05%
59 NN	-	-	91,89%	92,22%	-	-
61 NN	-	-	91,41%	91,74%	-	-
P2a NN	-	-	92,28%	92,68%	-	-

Die Abbildung 7-3 stellt nun die Kurven der Validierung nach Chung & Fabbri (2003) (s.o.) für die Testdaten (=prediction rate) aller 33 mittels neuronaler Netze gerechneten „Level hoch“-Ergebnisse dar. Es zeigte sich, dass die Güte der mit

kartierten Landnutzungsdaten gerechneten Ergebnisse (schwarze & rote Linien) meist nur wenig differiert, da die Kurven recht eng zusammen liegen. Einzig die Ergebnisse ohne den kartierten Werten für die Landnutzung (grüne Linien) liefern deutlich schlechtere Validierungsergebnisse, da sie weit unterhalb der anderen Kurven liegen. Die Validierungskurven der logistischen Regression zeigen ein ähnliches Bild.

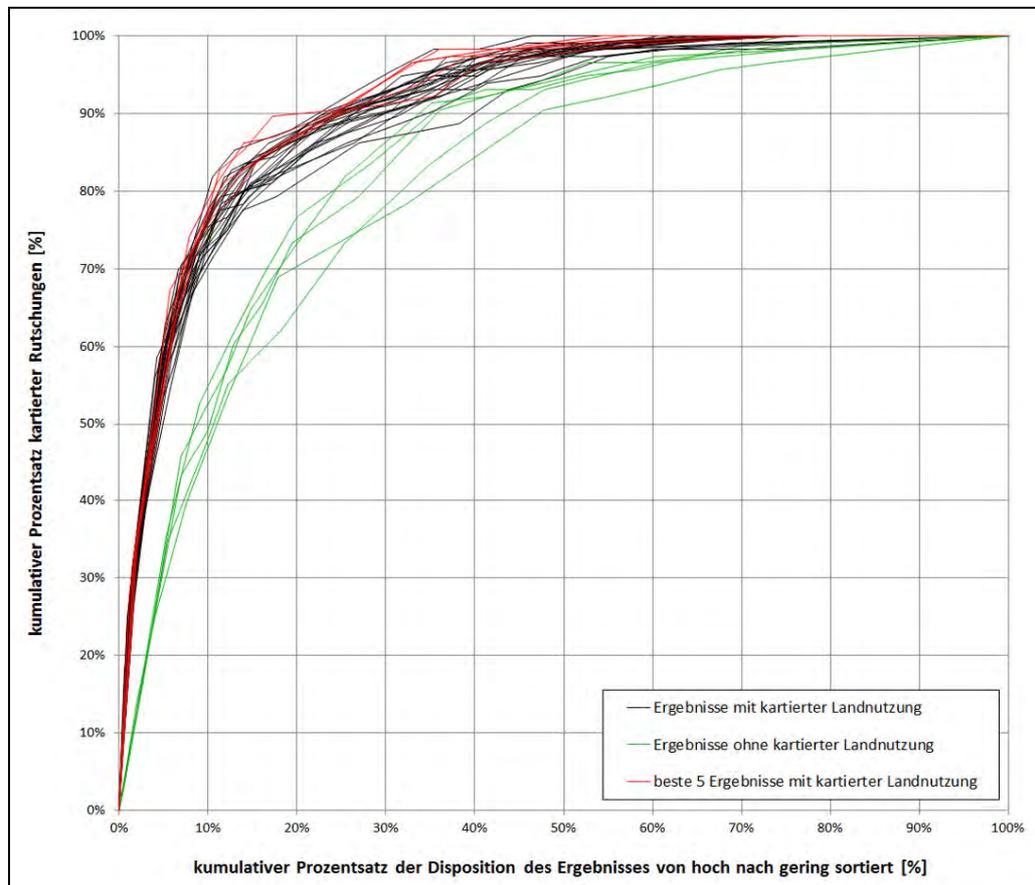


Abbildung 7-3: Validierung nach Chung & Fabbri (2003) für die Testdaten (=prediction rate) der „Level hoch“-Ergebnisse mittels neuronaler Netze

Da aufgrund ähnlich guter Validierungen der Ergebnisse (sowohl zwischen den Methoden als auch innerhalb einer Methode) und der unzureichenden Validierungsmethoden (siehe Diskussion) auch kein klares „bestes Ergebnis“ ausgewählt werden konnte, wurden jeweils die besten 5 Ergebnisse je Levelstufe von beiden Modellierungsmethoden für die Erzeugung einer gemeinsamen, **methodenübergreifenden Endergebniskarte** pro Levelstufe zusammengefügt (siehe V in Abb. 6.1-1). Diese beiden Endergebniskarten wurden zellspezifisch als Kombination aus mittlerer Disposition von jeweiligem Maximum und Minimum (= mid-range) einerseits sowie aus der Schwankungsbreite (= half range) andererseits berechnet. Diese kombinierten Endergebniskarten stellten somit die Disposition und deren räumliche Variabilität und Unsicherheit aufgrund der unterschiedlichen Modellierungsmethoden und der unvollständigen bzw. vereinfachten Datenlage dar. Daraus ergeben sich für viele Zellen mehrere mögliche Dispositionsklassen, welche in der modelübergreifenden Endergebniskarte „Level hoch“ in Abb. A1 im Anhang dargestellt sind. In weiterer Folge wurden nun die Verbesserungspotentiale der

verbesserten, prozessorientierten Parameterkarten (siehe Ib in Abb. 6.1-1) auch im Sinne einer **Kosten-Nutzen-Analyse** in Relation zum für die Kartenerzeugung benötigten Aufwand gestellt. Hierbei wurde der Zeitaufwand zur Erstellung einer Parameterkarte (x-Achse) in Beziehung zur durch diese Parameterkarte erzielten Verbesserung der Ergebnisqualität in der Dispositionskarte (y-Achse) gesetzt. Für kombinierte Parameterkarten wurde der Gesamtaufwand angegeben, das heißt, dass auch jener Zeitaufwand dazu gezählt wurde, der für die Erstellung der Basis-Parameterkarten benötigt wurde, aus denen die kombinierte Parameterkarte zusammengefügt wurde.

In Abbildung 7-4 ist diese Kosten-Nutzen-Analyse aller untersuchten Parameterkarten der Modellierung mit neuronalen Netzen exemplarisch für beide Modellierungsmethoden dargestellt. Hierbei wird der Zeitaufwand zur Erstellung einer Parameterkarte als Anteil des Aufwandes, der für die Parameterkarte mit Maximalaufwand erforderlich war, dargestellt. Orange Punkte repräsentieren „Level hoch“-Parameterkarten, „Level gering“-Parameterkarten werden durch die anderen Farben dargestellt. Grüne Punkte zeigen hierbei die aus verschiedenen Eingangsdaten hergeleiteten Varianten der „Level gering“-Waldkarte (mit Landnutzungskartierung), hellblaue Punkte die „Level gering“ Varianten der Abflussdispositionskarten. Die Pfeile verbinden jeweils eine „Level gering“-Parameterkarte mit der entsprechenden „Level hoch“-Parameterkarte bzw. die Waldkarte ohne und mit kartierter Landnutzung.

Die Grafik verdeutlicht nochmals die oben getroffenen Aussagen: So haben fast alle „Level hoch“-Parameterkarten gegenüber den entsprechenden „Level gering“-Parameterkarten keine Verbesserung in der Ergebnisqualität der Dispositionskarte gebracht (entspricht waagrechten Pfeilen), auch wenn zum Teil ein beträchtlicher Aufwand in die Erstellung der „Level hoch“-Karte gesteckt wurde. Der Mehraufwand zur Erstellung der „Level hoch“-Karten hat sich also fast nirgends gelohnt. Einzig im Falle der „Level hoch“-*Niederschlagskarte*, welche mit einem relativ großen Aufwand generiert wurde, konnte bei der logistischen Regression (hier nicht abgebildet) gegenüber der „Level gering“-Parameterkarte eine Verbesserung der Dispositionskarte erzielt werden. Bei den neuronalen Netzen kam es im Falle des Parameters *Wegenetz* hingegen sogar zu einer Verschlechterung der Dispositionskarte (absteigender Pfeil).

Deutlich ist jedoch die Verbesserung (aufsteigender Pfeil) zu erkennen, die sich beim „Level gering“-Parameter *Wald mit kartierter Landnutzung* gegenüber dem „Level gering“-Parameter *Wald ohne kartierter Landnutzung* ergab, wobei dies mit relativ geringem Aufwand geschah (die kartierten Werte müssen jedoch schon vorliegen). Beim Vergleich von verschiedenen Varianten *eines* Parameters zeigte sich auch hier sowohl beim Wald (grüne Punkte) als auch bei der Abflussdisposition (hellblaue Punkte), dass sich die Ergebnisse unabhängig vom aufgebrauchten Aufwand hinsichtlich des Qualitätslevels nicht unterscheiden (alle Punkte bleiben im gleichen Verbesserungs-level). Hierbei sei jedoch nochmals auf die Beschränktheit der Validierungsmethoden hingewiesen, die auch diesen Analysen zugrunde liegen (siehe Diskussion).

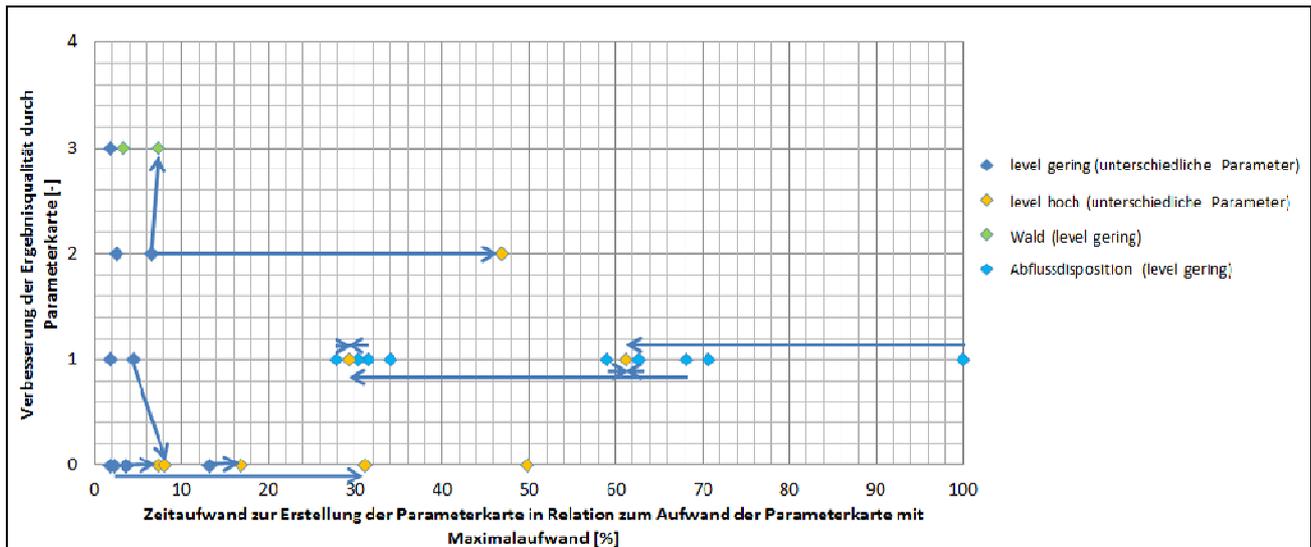


Abbildung 7-4: Kosten-Nutzen-Analyse der verwendeten Parameterkarten bei der Modellierung mittels neuronaler Netze

Diskussion

Die ausgebliebene Verbesserung durch die „Level hoch“-Parameterkarten und der damit verbundene vergebliche Aufwand zu deren Erstellung, die ähnlich guten Validierungen der Parameterkarten-Varianten und der besten Ergebnisse einer Methode, aber auch beider Methoden (logistische Regression und neuronales Netz) sowie die Verschlechterung der Modellgüte bei Parameterkombinationen mit höchster Prozessorientierung sind bemerkenswert und wurden in diesem Ausmaß vielfach nicht erwartet.

All diese Tatsachen können mehrere Gründe haben: So kann es tatsächlich sein, dass die jeweils verwendete „Level hoch“ Parameterkarte den entsprechenden Sachverhalt nicht realitätsnäher und prozessorientierter abbildete, als die „Level low“ Karte, sodass der Aufwand zur Erstellung der „Level high“-Parameterkarte für die Modellierung in Frage zu stellen ist. Weiters ist es auch möglich, dass Verbesserungen in der Parameterkarte aufgrund der für die Komplexität der Materie unzureichenden Datenlage vom Modell nicht erfasst werden konnten.

Darüber hinaus ist es aber wahrscheinlich, dass die eine oder andere „Level hoch“-Parameterkarte sehr wohl realitätsnäher und prozessorientierter war, als die entsprechende „Level low“-Karte, jedoch die angewandten Validierungsmethoden (siehe IV in Abb. 6.1-1) nicht imstande waren, die Verbesserungen in der Dispositionskarte zu erkennen. Dies ist dadurch begründet, dass diese Validierungsmethoden aus Sicht der Autoren zu vereinfachend sind und nur als grobes Bewertungsmaß herangezogen werden können, da sie nur gebietsintegrale Validierung darstellen. So können diese Validierungsmethoden partielle Unterschiede der Kartenqualität nicht erfassen, sodass kleine, gut modellierte Teilgebiete mit vielen Massenbewegungen das Validierungsergebnis eines gesamten Gebietes stark überprägen können. Die Unzulänglichkeit der Validierungsmethoden zeigte sich z.B. auch daran, dass durch die Integration des Parameters *Niederschlag* „Level hoch“ das Kartenbild eines Ergebnisses komplett modifiziert wurde und die Karte aufgrund des klaren Einflusses dieses Parameters wohl auch verbessert wurde, das Validierungsergebnis aber stets nahezu unverändert blieb.

8 Modellierung von Prozessräumen

Für Fragen der Planung ist das Wissen um den gesamten Prozessbereich (Anriss-Transport- und Ablagerungsbereich) entscheidend. Spontane Rutschungen im Lockersediment haben, insbesondere wenn sich aus Hangmuren entwickeln, einen Wirkungsbereich der ein Vielfaches der eigentlichen Abrissfläche beträgt. Deswegen wurde ein Modell entwickelt, das die Rutschungs-Dispositionskarten um flächendeckende Informationen zum Prozessbereich ergänzen kann.

Das entwickelte Modell (ASlide) ist ein einfacher, empirischer von α/β Lawinenmodellen (Klebinder et al. 2009) abgeleiteter Ansatz, der auch hinsichtlich der Transport- und Ablagerungsbereiche dokumentierte Rutschungsereignisse voraussetzt. Diese erlauben die Bestimmung des Alpha-Winkels und dienen zur iterativen Eineichung desselben und weiterer Modellparameter wie insbesondere der Gewichtung der Krümmung (Oberfläche quer zur Fließrichtung) und der Rauigkeit im Längsprofil (Wirkung von Geländestufen etc.).

Von allen Punkten (Pixeln), die z.B. über Dokumentationen als tatsächliche Anrissbereiche bekannt sind oder durch Dispositionskarten als wahrscheinliche Anrisspunkte ausgewiesen werden, bestimmt das Modell mittels eines „multiple flow approaches“ über Vergleich mit den Nachbarzellen den Transportweg. Dieser Prozess wird bis zur Unterschreitung des angegebenen Alpha Winkel ausgeführt. Auch wenn es keine tiefer gelegene Zelle (Toleranz möglich) mehr gibt, wird die Berechnung gestoppt.

Entscheidend für das Modellierungsergebnis (von Rutschungen betroffene Flächen) ist jedenfalls die Qualität des Geländemodells und der Dokumentation. Für Modellierungen auf der Basis von Dispositionskarten ist neben der Qualität des Dispositionsmodelles insbesondere die Wahl des Startkriteriums (Schwellwert der Disposition) entscheidend für das Ergebnis. Aus mathematischen Gründen wird vorerst die Wahl eines Schwellwerts von 0,5 vorgeschlagen. Letztlich ist die Schwellwertfestlegung aber auch eine politische Entscheidung, die darüber zu befinden hat, welches „Restrisiko“ in Kauf genommen wird.

Hinsichtlich der Ergebnisdarstellung kann zwischen zwei Optionen gewählt werden. Die einfach zu interpretierende Variante unterscheidet nur zwischen Flächen, die von Rutschungsprozessen betroffen sind oder nicht (Abb. 8-1). Die erweiterte Variante übernimmt den jeweils höchsten Wert aus der Dispositionskarte und erlaubt dadurch die Darstellung der relativen Wahrscheinlichkeiten. Es werden dadurch auch Flächen niederer Rutschungsdisposition die von oberhalb gelegenen Flächen mit höherer Rutschungsdisposition beeinflusst sind entsprechend der höheren Gefahr dargestellt (Abb. 8-2, Anhang, Abb. A4).

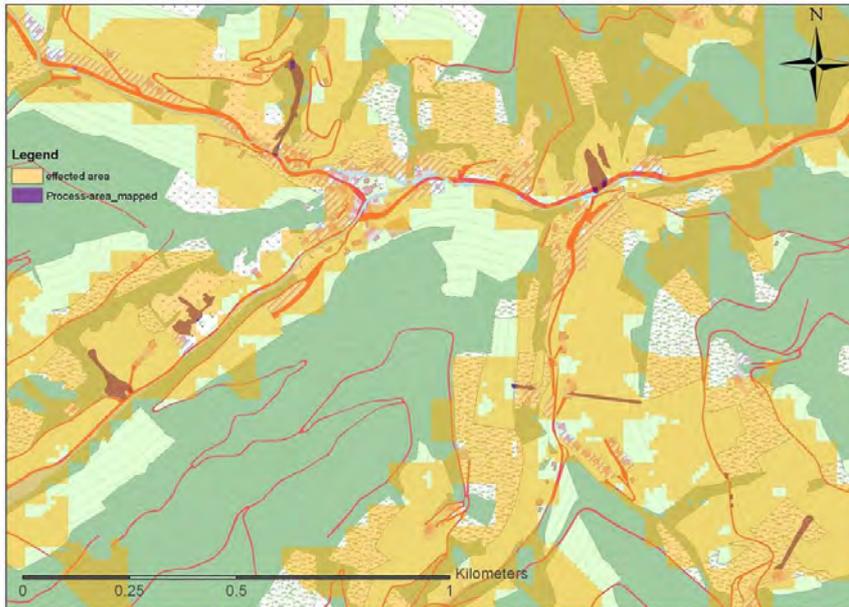


Abb. 8-1: Modellanwendung mit von der Rutschungsdispositions-karte übernommenen Werten (Ortsbereich Gasen, mit Untergrenze für Alpha = 17° - „sichere Seite“). Die dokumentierten Prozessbereiche (violett) werden mit diesen Modellparametern als gefährdete Bereiche ausgewiesen (braun), allerdings auch der Grossteil des Siedlungsraumes



Abb. 8-2: Modellanwendung mit von der Rutschungsdispositions-karte übernommenen Werten (Ortsbereich Gasen). In einigen Bereichen ist die Gefährdung durch den Transportprozesse aus oberhalb gelegenen Flächen größer als die Rutschungsdisposition (vgl. Bsp. Kreis: Die von der Dispositions-karte ausgewiesene Disposition der Fläche von 0,5-0,6 ist aus diesem Grund auf 0,8-0,9 zu erhöhen)

9 Potenziale der Methoden zur Modellierung von Dispositionen bei veränderten Rahmenbedingungen (Niederschlag, Landnutzung)

Mit Hilfe von Neuronalen Netzen und logistischer Regression konnten plausible Szenarien der Rutschungsdisposition bezüglich veränderter Landnutzung und variablen Niederschlages gerechnet werden.

Hinsichtlich Landnutzung wurden die Szenarien „komplette Entwaldung“ (Abb. A2 im Anhang) bzw. „komplette Aufforstung“ (Abb. A3 im Anhang) gerechnet und deren Auswirkungen auf die Rutschungsdisposition untersucht. Hierbei kam es bei Ersterem in weiten Bereichen zu einer starken Zunahme der Rutschungsdisposition in den entwaldeten Gebieten bzw. bei Zweiterem zu einer starken Reduktion der Rutschungsdisposition in den aufgeforsteten Gebieten. Dies unterstreicht den starken Einfluss der Parameterkarte Wald auf die Modellierung bzw. auf die Dispositionsverteilung. Basierend auf diesen Szenarien ist es grundsätzlich möglich, konkrete Aussagen für die Raumplanung abzuleiten, wie z.B.:

- In welchen Gebieten ist es sinnvoll aufzuforsten / macht Aufforstung keinen Sinn?
- In welchen Gebieten muss Schlägerung vermieden werden / kann Schlägerung erlaubt werden?
- In welchen Gebieten haben Schlägerung / Aufforstung kaum Auswirkungen auf die Rutschungsdisposition?

Hinsichtlich der Niederschlagsverteilung wurden die Szenarien „flächendeckender maximaler Ereignisniederschlag“ und „flächendeckender minimaler Ereignisniederschlag“ des Ereignisses vom August 2005 gerechnet, wobei signifikante und plausible Ergebnisse nur mit der Niederschlagskarte „Level hoch“ erzielt werden konnten. Hierbei kam es beim Szenario „maximaler Niederschlag“ erwartungsgemäß zu einem starken Ansteigen der Rutschungsdisposition in Gebieten mit geringem Ereignisniederschlag. Beim Szenario „minimaler Niederschlag“ kam es hingegen zu einer starken Verringerung der Rutschungsdisposition in Gebieten mit hohem Ereignisniederschlag. Basierend auf diesen Szenarien können ebenfalls konkrete Aussagen für die Raumplanung abgeleitet werden, wie z.B.:

- Welche Gebiete hatten beim August-Ereignis 2005 Glück, da sie weniger Niederschlag erhielten, müssen aber bei Niederschlagssummen in der Höhe des Maximalniederschlages vom August 2005 mit dem Abgang von deutlich mehr Massenbewegungen rechnen?
- Welche Gebiete reagieren sehr / wenig sensitiv auf veränderte Niederschlagssummen?

Anhand der verwendeten Methodik wäre es generell technisch möglich, auch Klimawandel-Niederschlagsszenarien in die Rutschungsdispositions-Modellierung einzubinden. Jedoch liegen für die Niederschlagsverteilung, insbesondere was eine kurze zeitliche Periode (z.B. Tage) und eine feine räumliche Auflösung (z.B. 1 km) betrifft, derzeit keine verlässlichen und abgesicherten Climate-Change-Niederschlagsszenarien vor.

10 Schlussfolgerungen

Bei Analyse der untersuchten Teilaspekte der Rutschungsdispositionsmodellierung zeigte sich Folgendes:

Die Auswertungen hinsichtlich des Verbesserungspotentials der Modellierung durch die Parameterkarten (vgl. Ia und Ib in Abb. 6.1-1) zeigten deutliche Verbesserungen der Ergebnisse bei Integration der Parameterkarten *Wald*, *Wegenetz*, *Vertikalwölbung*, *Hangneigung* und zum Teil auch bei der *Niederschlagsverteilung* und den verschiedenen Varianten der *Abflussdisposition*. Andere Parameter (*Fließakkumulation*, *geologische Grunddisposition*, *Grunddisposition aufgrund der Bodenkarte* und *Hangklassifikation*), von denen ebenfalls eine Verbesserung erwartet wurde, konnten diese Erwartung jedoch nicht erfüllen. Bei fast allen im Hinblick auf die Prozessorientierung verbesserten „Level hoch“-Parameterkarten (vgl. Ib in Abb. 6.1-1) galt, dass es bei deren Verwendung im Vergleich zur Verwendung der jeweiligen „Level gering“-Parameterkarte ebenfalls zu keiner Verbesserung des Ergebnisses kam (einzige Ausnahme war der Parameter *Niederschlag* „Level hoch“). Der zum Teil enorme Aufwand, der in die Erstellung dieser verbesserten Parameterkarten gesteckt wurde, schien also größtenteils vergeblich.

Bei den Parameterkarten-Varianten für *Wald* und *Abflussdisposition* zeigte sich, dass alle diese Varianten zu ähnlich guten Ergebnissen führten. Weiters traten bei den meisten Durchläufen von Parameterkombinationen mit höchster Prozessorientierung sogar Verschlechterungen im Ergebnis auf. Schließlich kam es auch zu ähnlich guten Validierungen der besten Ergebnisse sowohl im Vergleich zwischen den zwei bestgeeigneten Methoden (logistische Regression und neuronales Netz) als auch innerhalb einer Methode, sodass keine Methode bzw. kein Ergebnis klar bevorzugt werden konnte (vgl. III in Abb. 6.1-1).

Diese ausgebliebenen Verbesserungen bzw. Differenzierungen der Ergebnisse waren bemerkenswert und wurden in diesem Ausmaß vielfach nicht erwartet. Als mögliche Gründe hierfür sind zu nennen, dass die jeweils verwendete „Level hoch“ Parameterkarte den entsprechenden Sachverhalt nicht realitätsnäher und prozessorientierter abbildete, als die „Level gering“ Karte. Weiters kann es sein, dass die Verbesserungen in der Parameterkarte aufgrund der für die Komplexität der Materie unzureichenden Datenlage vom Modell nicht erfasst werden konnten. Schließlich liegt der Hauptgrund aus Sicht der Autoren jedoch wahrscheinlich darin, dass die verwendeten, international üblichen gebietsintegralen Validierungsmethoden (IV in Abb. 6.1-1) nicht imstande waren, die durch die verbesserten und/oder stärker prozessorientierten Parameterkarten hervorgerufenen Verbesserungen in den Rutschungsdispositionskarten zu erfassen. Dieses Defizit unterstreicht die Notwendigkeit der Entwicklung von neuen, partiellen Validierungsmethoden, um zukünftig seriöse Aussagen sowohl bezüglich der Modellgüte und der Verbesserungsmöglichkeiten von Endergebnissen als auch der Fähigkeit einzelner Modellierungsmethoden vornehmen zu können.

Aus den unzureichenden Validierungsmethoden kann weiters geschlossen werden, dass, so wie dies im Projekt AdaptSlide demonstriert wurde, auch in weiterfolgenden Projekten stets mehrere Validierungsmethoden in Kombination verwendet werden sollten, solange keine zuverlässigere Validierungsmethode entwickelt wurde. Auch sollte nicht *ein* Ergebnis *einer* Modellierungsmethode als bestes Endergebnis ausgewählt werden, sondern es sollte eine Kombination aus mehreren Ergebnissen

verschiedener Modellierungsmethoden und Parameterkombinationen als Endergebnis angegeben werden, um so die Unsicherheit der Modellierungsergebnisse erfassbar zu machen (V in Abb. 6.1-1). Diese kombinierte Endergebnisdarstellung wurde im Projekt AdaptSlide erfolgreich durchgeführt. Hierin unterscheidet sich dieses Projekt wesentlich von zahlreichen anderen einschlägigen Untersuchungen, in denen meist nur *ein* bestes Ergebnis präsentiert wird, ohne auf die stets vorhandenen Unsicherheiten dieses Ergebnisses einzugehen.

Ein weiteres wichtiges Resultat des Projektes war die deutliche Verbesserung der Ergebnisse durch die im Aufnahmebereich der Massenbewegungen kartierten Einflussfaktoren von Bäumen (Stabilisierung durch Baumwurzeln) und des Wegenetzes (z.B. Hangversteilung, Wegentwässerung, II in Abb. 6.1-1). Diese zeigt deutlich die enorme Wichtigkeit einer Kartierung dieser Landnutzungsinformationen und Einflussfaktoren im Rahmen der Ereignisdokumentation von gravitativen Massenbewegungen. So sollte darauf - und auf die Beschaffung von qualitativ hochwertigen und möglichst vollständigen Daten - bei zukünftigen Projekten besonderes Augenmerk gelegt werden.

Literatur:

- Andrecs P., Hagen K., Fromm R., Gauer P., Höller P., Klebinder K., Kohl B., Lang E., Markart G., Perzl F., Stary U., Zeidler A 2010: AdaptEvent. Analyse der Sicherheit und Genauigkeit von Bemessungswerten bei gravitativen alpinen Naturgefahren und Ableitung von Anpassungsstrategien an den Klimawandel. Endbericht des BFW im Auftrag des BMLFUW im Rahmen des EU Projekts AdaptAlp ("Adaptation to Climate Change in the Alpine Space"), Wien: 321 S, <http://bfw.ac.at/db/bfwcms.web?dok=8601>
- Andrecs et al. 2007 Andrecs, P., Hagen, K., Lang, E., Stary, U., Gartner, K., Herzberger, E., Riedel, F. & Haiden, T. (2007): Dokumentation und Analyse der Schadensereignisse 2005 in den Gemeinden Gasen und Haslau (Steiermark). BFW-Dokumentation; Schriftenreihe des Bundesforschungs- und Ausbildungszentrums für Wald, Naturgefahren und Landschaft, Wien, Nr. 6, 75 p.
- BMLFUW 2006, BMLFUW (2006): Hochwasser 2005 – Ereignisdokumentation, Teilbericht der Wildbach- und Lawinenverbauung
- Chiffard, P. & Tilch, N. (2010): Learning from Nature – Mapping of Complex Hydrological and Geomorphological Process Systems for More Realistic Modelling of hazard-related maps.-Poster und abstract, EGU General Assembly 2010, Session HS13.13/NH3.16 „Hydrological processes in landslide research: analysis and quantification“, 05.05.2010, Wien. [http://www.geologie.ac.at/pdf/Poster/poster_2010_chiffard_tilch.pdf]
- Chung & Fabbri (2003): Validation of spatial prediction models for landslide hazard mapping. In: Natural Hazards 30, pp. 451-472
- eBod (2010): www.bodenkarte.at
- Haberler, A., Schwarz, L., Lotter, M. & Kociu, A. (2009): Rutschungen in der Katastrophenregion Feldbach (Steiermark) im Sommer 2009 - eine vorläufige Bestandsaufnahme.- Geoforum Umhausen, Niederthai, 15./16.10.2009
- Haiden, T., A. Kann, G. Pistotnik, K. Stadlbacher, and C. Wittmann, 2009: Integrated Nowcasting through Comprehensive Analysis (INCA) – System description. ZAMG documentation, 60p. http://www.zamg.ac.at/fix/INCA_system.pdf
- Klebinder K., R. Fromm, F. Perzl (2009): Ausweisung von Lawinenschutzwald mittels GIS und einfachen Modellrechnungen. In: Strobl, Blaschke, Griesebner (Hrsg.): Angewandte Geoinformatik 2009. Beiträge zum 21. AGIT- Symposium, Salzburg.
- Klebinder K., Kohl B., Markart G. und B. Sotier (2008): Regionalisierung der Oberflächenabflussdisposition, Oberflächenrauigkeit und der hydrologischen Vegetationseinheiten. Unveröffentlichter Projektbericht des BFW im Auftrag des FTD f. WLW, GBL Südliches Niederösterreich und Burgenland.
- Markart G., Kohl B., Sotier B., Schauer T., Bunza G. and R. Stern (2004): Provisorische Geländeanleitung zur Abschätzung des Oberflächenabflussbeiwertes auf alpinen Boden-/Vegetationseinheiten bei konvektiven Starkregen (Version 1.0). BFW-Dokumentation, Nr.3
- Markart, G., Perzl, F., Kohl, B., Luzian, R., Kleemayr, K., Ess, B., Mayerl, J. (2007): 22. und 23. August 2005 - Analyse von Hochwasser- und Rutschungsereignissen in ausgewählten Gemeinden Vorarlbergs. 22nd and 23rd August 2005 - Analysis of flooding events and mass movements in selected communities of Vorarlberg. BFW-Dokumentation, Wien, (5).
- SCHWARZ, L., HABERLER, A., TILCH, N., LOTTER, M., KOÇIU, A. (2009): Massenbewegungen in der Katastrophenregion Bezirk Feldbach im Juni 2009, Zwischenbericht. Interner Bericht für Land Steiermark, 19 S., 6 Abb., Geol.B.-A. (Wien).
- TILCH, N. (2009): Gravitative Massenbewegungen in der Katastrophenregion Klingfurth (Walpersbach, Südliches Niederösterreich) im Juni 2009 – Erkundungsergebnisse und eine erste Abschätzung des rutschungsinduzierten Gefahrenpotentials .- 11. Geoforum Umhausen 15.-16.10.09, Niederthai. [http://www.geologie.ac.at/pdf/Poster/poster_2009_geoforum_tilch.pdf]
- Tilch, N. & Koçiu, A. (2006): Massenbewegungen in der Katastrophenregion Gasen-Haslau (Oststeiermark) im August 2005.- Tagung Pangeo06, 17. – 20. 09.2006 in Innsbruck, Posterpräsentation S3 Alpine Naturgefahren – Massenbewegungen. http://www.geologie.ac.at/pdf/Poster/poster_2006_pangeo06_tilch.pdf

Tilch, N., Kociu, A., Ribitsch, R., Schmid, F., Proske, H., Andrecs, P., Hagen, K., Lang, E., Hermann, S. & Loizenbauer, J. (2009): Abschätzung der Risikodisposition für Rutschungen und Hangbewegungen am Beispiel Gasen/Haslau (Stmk).- FloodRisk II - Vertiefung und Vernetzung zukunftsweisender Umsetzungsstrategien zum integrierten Hochwassermanagement. Posterpräsentation im Rahmen der Ergebnispräsentationsveranstaltung 29./30.06.2009, Wien. [http://www.geologie.ac.at/pdf/Poster/poster_2009_floodrisk_II.pdf]

Tilch, N. & Schwarz, L. (2010): Erstellung von Dispositionskarten für Massenbewegungen – Herausforderungen, Methoden, Chancen, Limitierungen.- Vortrag Innsbrucker Hofgespräche 26.05.2010, Innsbruck. [http://bfw.ac.at/050/pdf/IHG260510_Tilch_Schwarz.pdf]

Autorenverzeichnis

GBA: **Tilch Nils**, Schwarz Leonhard,

E-mail: Nils.Tilch@geologie.ac.at

BFW: **Hagen Karl**, Aust Günter, Fromm Reinhard, Herzberger Edwin, Klebinder Klaus, Perzl Frank

E-mail: karl.hagen@bfw.ac.at

JR: **Proske Herwig**, Bauer Christian, Kornberger Birgit, Kleb Ulrike, Granica Klaus

E-mail: herwig.proske@joanneum.at

ZAMG: **Pistotnik Georg**, Haiden Thomas

E-mail georg.pistotnik@zamg.ac.at

Anhang

Dispositionsklassen

- sehr geringe Disposition
- geringe Disposition
- moderate Disposition
- hohe Disposition
- sehr hohe Disposition
- sehr geringe bis geringe Disposition
- sehr geringe bis moderate Disposition
- sehr geringe bis hohe Disposition
- geringe bis moderate Disposition
- geringe bis hohe Disposition
- moderate bis hohe Disposition
- geringe bis sehr hohe Disposition
- moderate bis sehr hohe Disposition
- hohe bis sehr hohe Disposition
- Massenbewegungen
- Alluvium

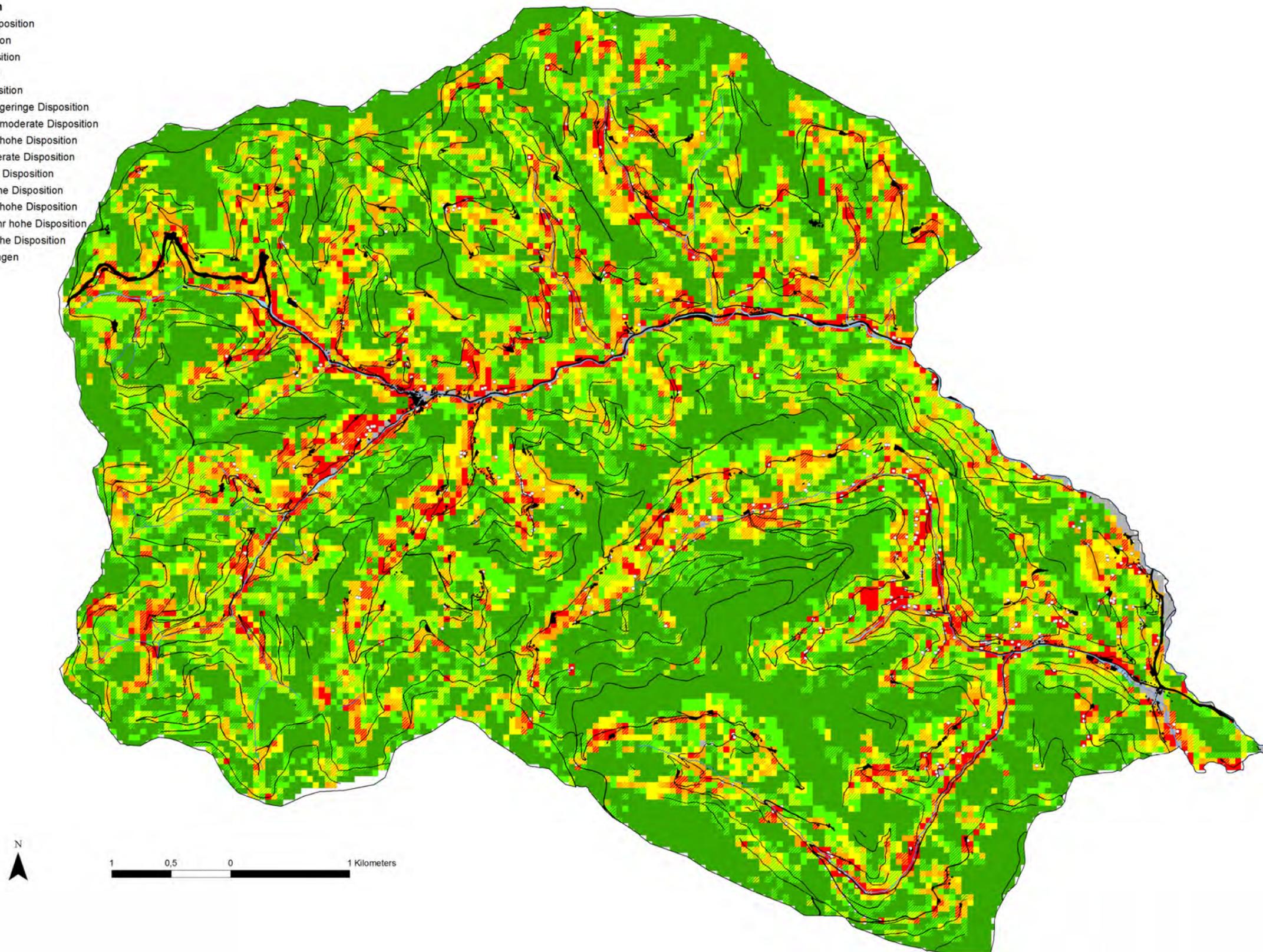


Abbildung A1: Methodenübergreifende Dispositionskarte der besten 5 „Level hoch“ Ergebnisse

Rutschungsdisposition

- < 0,1
- 0,1 - 0,2
- 0,2 - 0,3
- 0,3 - 0,4
- 0,4 - 0,5
- 0,5 - 0,6
- 0,6 - 0,7
- 0,7 - 0,8
- 0,8 - 0,9
- > 0,9
- Massenbewegungen
- Alluvium

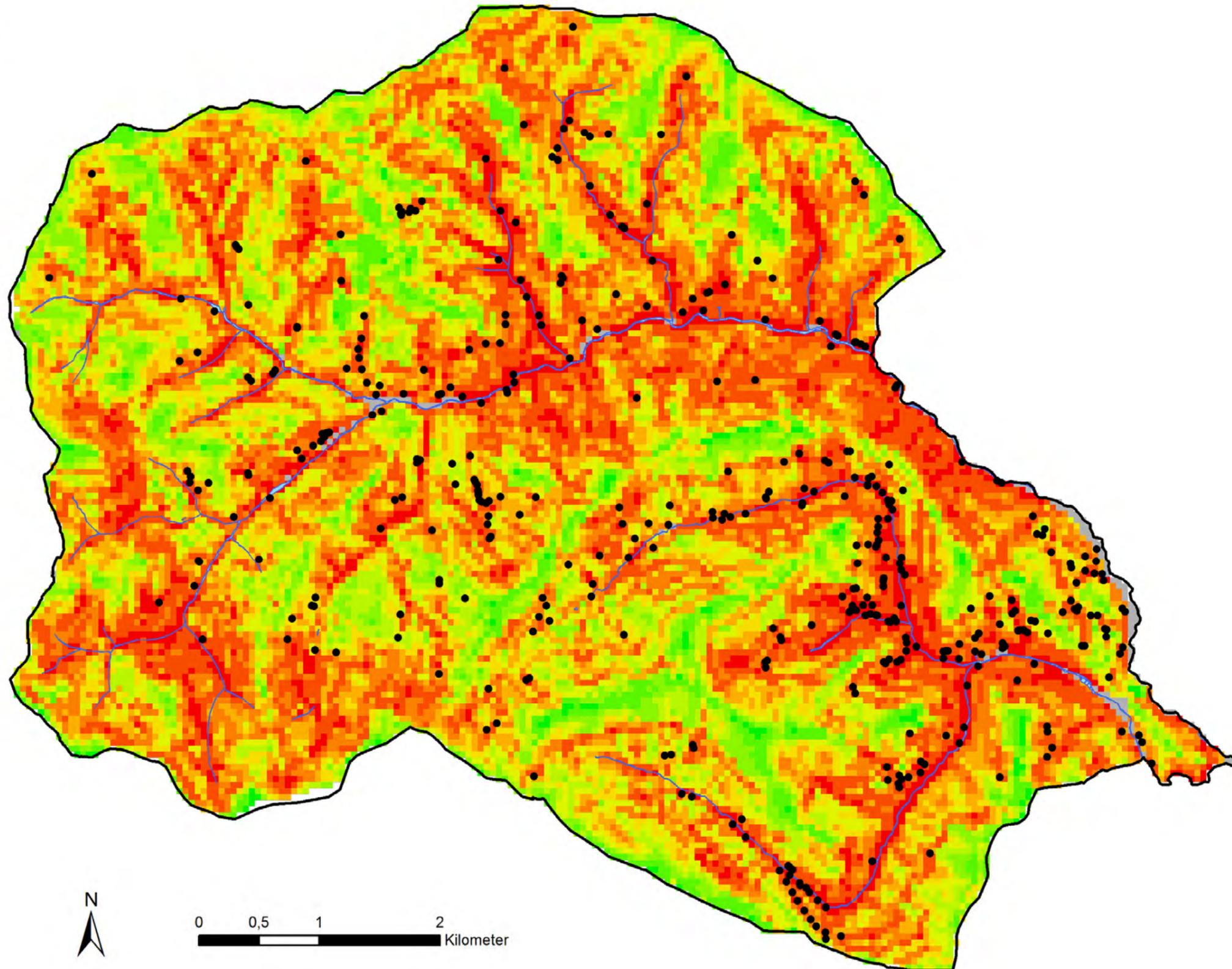


Abbildung A2: Wald-Szenario „komplette Entwaldung“ errechnet mittels neuronaler Netze.

Rutschungsdisposition

- < 0,1
- 0,1 - 0,2
- 0,2 - 0,3
- 0,3 - 0,4
- 0,4 - 0,5
- 0,5 - 0,6
- 0,6 - 0,7
- 0,7 - 0,8
- 0,8 - 0,9
- > 0,9
- Massenbewegungen
- Alluvium

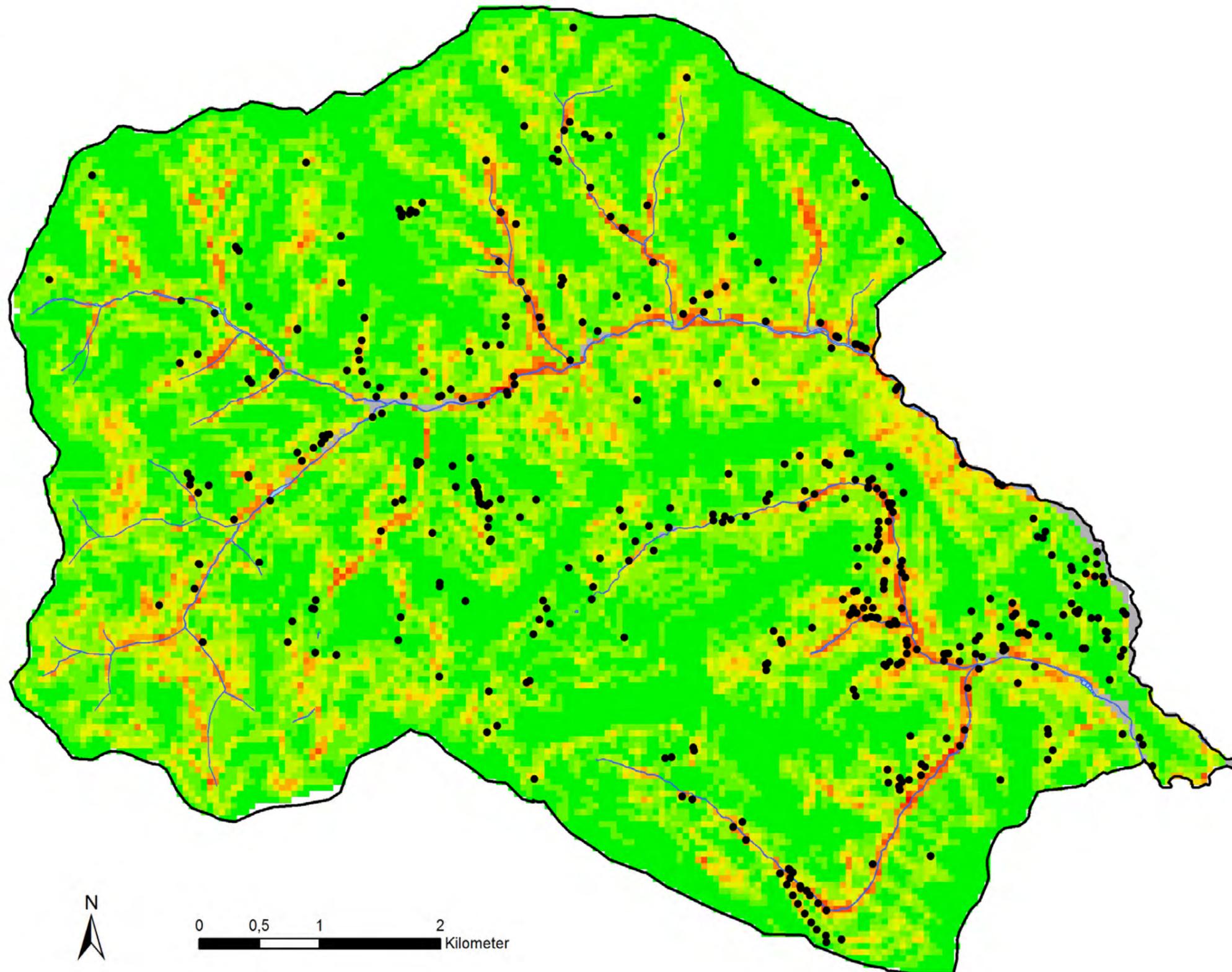


Abbildung A3: Wald-Szenario „komplette Aufforstung“ errechnet mittels neuronaler Netze.

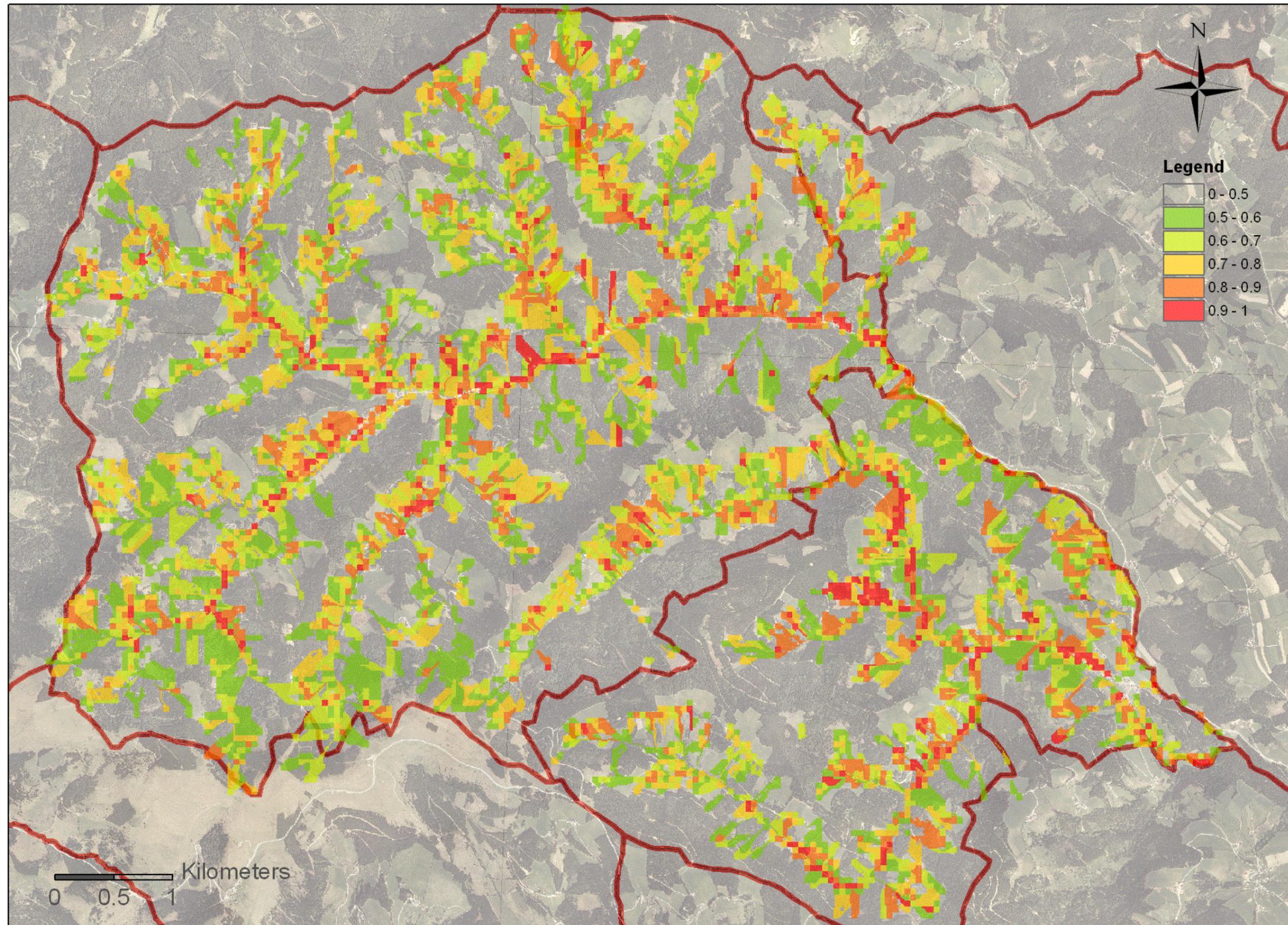


Abbildung A4: Prozessräume errechnet mit ASlide (Reichweitenmodell)