

ZÜRCHER HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE WISSENSCHAFTEN

DEPARTEMENT LIFE SCIENCES UND FACILITY MANAGEMENT

INSTITUT FÜR UMWELT UND NATÜRLICHE RESSOURCEN

Keyline-Design als Wassermanagementstrategie in der Landwirtschaft

Bachelorarbeit

von

Gil Cordeiro, Diego Manuel

Bachelorstudiengang Umweltingenieurwesen HS18

Abgabedatum 12.01.2023

Studienrichtung Biologische Landwirtschaft und Hortikultur

Fachkorrektur:

Dr. Junghardt, Johann

ZHAW, Grüental, 8820 Wädenswil

Jäger, Mareike

ZHAW, Grüental, 8820 Wädenswil

Impressum

Schlagworte (Keywords):

Keyline-Design, Wassermanagement, Dürre, Drainage, Landwirtschaft, Swales, Tiefenlockerung

Zitiervorschlag:

Gil Cordeiro, D. (2023), «*Keyline-Design als Wassermanagementstrategie in der Landwirtschaft*», Bachelorarbeit, Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften ZHAW, Wädenswil, Schweiz.

Institution:

Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften Life Sciences und Facility Management, Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen, Grüentalstrasse 14, 8820 Wädenswil.

Zusammenfassung

Landwirtschaftliche Produktionssysteme sind als direkte Konsequenz des globalen Klimawandels zunehmend von den Auswirkungen von Extremwetterereignissen betroffen. Daher ist es notwendig zu verstehen, in welcher Form resiliente und nachhaltige Kultivierungspraktiken in die Landwirtschaft integriert werden können. Das Ziel in der vorliegenden Arbeit ist es zu beantworten, ob die Wassermanagementstrategie Keyline-Design einen möglichen Lösungsansatz darstellt, um die Auswirkungen von Dürre und das Ausmass der Umweltbelastung durch die Landwirtschaft zu reduzieren. Dazu werden die folgenden Fragen gestellt: Was charakterisiert ein Keyline-System und wie lautet der aktuelle Forschungsstand? Welche Erfahrungswerte konnten aus der Umsetzung bereits existierender Keyline-Projekte gewonnen werden und an welchen Stellen besteht bei der Vorgehensweise noch Optimierungsbedarf? Um die Forschungsfragen zu beantworten, wurde im Rahmen einer Konzeptanalyse eine Literaturrecherche durchgeführt. Anschliessend wurden im Zuge einer Fallstudie Keyline-Muster auf einer ausgewählten Fläche modelliert. Die Ergebnisse zeigen, dass Keyline-Design unter bestimmten Voraussetzungen über das Potenzial verfügt, Bodeneigenschaften und Umweltfaktoren zu verbessern, die Thematik jedoch bislang wenig akademische Aufmerksamkeit bekommen hat. Bei der gegenwärtigen Vorgehensweise zur Erstellung von Keyline-Mustern besteht durch den Einsatz algorithmusbasierter Werkzeuge grosses Optimierungspotential. Diese Bachelorarbeit dient als Grundlage für weiterführende Forschungen in diesem Bereich.

Abstract

Agricultural production systems are increasingly affected by the effects of extreme weather events as a direct consequence of global climate change. Therefore, it is necessary to understand in which forms resilient and sustainable cultivation practices can be integrated into agriculture. The aim of this thesis is to answer whether the water management strategy Keyline Design represents a possible solution to reduce the impact of agricultural drought and mitigate environmental pollution caused by agriculture. The following questions are asked: What characterizes a Keyline system and what is the current state of research? Which empirical findings could be gained from the implementation of existing Keyline projects and at which points is there still a need for optimization in the procedure? In order to answer the research questions, a literature search was carried out as part of a concept analysis. Then, as part of a case study, Keyline patterns were modeled on selected agricultural land. The results show that under certain conditions, keyline design has the potential to improve soil properties and environmental factors, but to date the topic has received little academic attention. With the current procedure for creating Keyline patterns, there is great potential for optimization through the use of algorithm-based tools. This bachelor thesis serves as a basis for further research in this area.

*«Soil is the film of life which covers much of the land surface of this planet Earth.
It is so thin that a light coat of paint on a large-scale model of the earth
would be much too thick to represent to scale the thickness of the soil.
But it is the home of all earthly life and the great raw material of agriculture.»*
(P. A. Yeomans, 1954, S. 25)

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Landwirtschaftliche Dürre.....	1
1.1.1	Dürreminderungsmaßnahmen.....	3
1.2	Gewässerverschmutzung.....	4
1.2.1	Drainagesysteme	4
1.3	Zielsetzung der Arbeit.....	5
2	Theorie Keyline-Konzept	6
2.1	Ursprung.....	6
2.2	Forschungsstand.....	6
2.3	Grundgedanke	7
2.4	Gesamtkonzept.....	9
2.5	Begriffserklärung Keyline.....	10
2.6	Keyline-Muster	10
2.7	Gewässerordnungszahl nach Horton-Strahler.....	13
2.8	Wasserspeicherkörper	13
2.9	Keyline-Pflug.....	14
2.10	Vorgehensweise Erstellung Keyline-Muster.....	16
2.11	Beispiele aus der Praxis	28
2.12	Agroforstwirtschaft	30
2.12.1	Umweltziele Schweizer Landwirtschaft.....	31
2.13	Diskussion der Ergebnisse der Literaturrecherche	32
3	Fallstudie Erstellung Keyline-Muster.....	34
3.1	Untersuchungsgebiet.....	34
3.2	Datengrundlage	35
3.3	Vorgehensweise	36
3.3.1	Einzugsgebietsanalyse	36
3.3.2	Aufbereitung Höhendaten:.....	36
3.3.3	Feldmarkierung.....	37

3.3.4 Hangneigung berechnen.....	38
3.3.5 Erstellung Höhenlinien	39
3.3.6 Vorgewende	39
3.3.7 Hydrologische Analyse.....	40
3.3.8 Zeichnen der Keyline-Muster	42
3.3.7 Ausschneiden.....	43
3.4 Ergebnis Keyline-Muster	44
3.5 Diskussion der Ergebnisse der Fallstudie.....	45
4 Diskussion	48
5 Fazit.....	50
6 Literaturverzeichnis.....	51
Verzeichnis der Abbildungen	58
Verzeichnis der Tabellen.....	61
Anhang	I
Anhang A: Ressourcenschutz durch Agroforstsysteme	I
Anhang B: Persönliche Kommunikation mit Keyline-Experte Georgi Pavlov	II
Anhang C: Karte mit Keyline-Muster für Grüezi Garten GmbH.....	III

Liste der Abkürzungen:

BAFU	Bundesamt für Umwelt
BLW	Bundesamt für Landwirtschaft
DD	Decimal Degrees
DHM	Digitales Höhenmodell
DOM	Digitales Oberflächenmodell
GIS	Geoinformatiksystem
LN	Landwirtschaftliche Nutzfläche
LiDAR	Light Detection and Ranging
LV95	Grundlagentnetz Schweizer Landesvermessung

1 Einleitung

Der Klimawandel ist mittlerweile von den meisten Regierungen als eine der grössten Bedrohungen des 21. Jahrhunderts anerkannt worden. Laut dem Bericht des Weltklimarates (2021) sind die Temperaturen in den letzten 170 Jahren mit regionalen Unterschieden global signifikant gestiegen. Obwohl die globalen Durchschnittstemperaturen durch die La-Niña-Ereignisse 2020–2022 vorübergehend abgekühlt sind, war 2021 immer noch eines der sieben wärmsten Jahre seit Beginn der Aufzeichnungen. Angesichts der Rekordwerte von Treibhausgasen in der Atmosphäre wird erwartet, dass sich die globale Erderwärmung und andere langfristige Klimaänderungstrends aufgrund natürlicher klimatischer Prozesse seit der letzten Eiszeit fortsetzen werden. Die durchschnittliche globale Temperatur im Jahr 2021 lag etwa $1,11^{\circ}\text{C}$ ($\pm 0,13$) über dem vorindustriellen Niveau (1850–1900). 2021 war das siebte Jahr in Folge (2015–2021), in dem die globale Temperatur mehr als 1°C über dem vorindustriellen Niveau lag (*United in Science*, 2022). Aussergewöhnliche Hitzewellen brachen Rekorde im Westen Nordamerikas und im Mittelmeerraum. Das kalifornische Death Valley erreichte am 9. Juli 2021 $54,4^{\circ}\text{C}$ und Syrakus auf Sizilien erreichte $48,8^{\circ}\text{C}$. Viele Teile der Welt waren von Dürren betroffen, darunter Gebiete in Kanada, den Vereinigten Staaten, der Islamischen Republik Iran, Afghanistan, Pakistan, der Türkei und Turkmenistan. In Kanada führte eine schwere Dürre dazu, dass die prognostizierte Weizen- und Rapsproduktion um 35 bis 40 % unter dem Ertrag von 2020 lag, während in den Vereinigten Staaten der Pegel des Lake Mead am Colorado River im Juli 47 m unter den maximalen Wasserstand fiel – der niedrigste je gemessene Stand seit Beginn der Aufzeichnungen. Hydrometeorologische Umwelt Ereignisse zwangen vielerorts Menschen in die Flucht. Die Länder mit den höchsten Zahlen an Flüchtenden im Jahr 2021 waren China (1,4 Millionen Menschen), Vietnam (664'000) und die Philippinen (600'000) (Kappelle et al., 2022). Verallgemeinert lässt sich sagen, dass die natürliche Erderwärmung, welche seit der letzten Eiszeit vor 21'000 Jahren voranschreitet (Clark et al., 1999), den weltweiten Wasserkreislauf intensiviert (Yang et al., 2021) und dadurch die globale Menge an durchschnittlichem Niederschlag, der Evaporation sowie den Oberflächenabfluss erhöht und die Frequenz von extremen Wetterereignissen verstärkt.

1.1 Landwirtschaftliche Dürre

Von allen klimatisch bedingten Umweltkatastrophen entwickeln sich Dürren am langsamsten und dauern am längsten an (Bathiany et al., 2021). Dürren stellen für klimatisch sensible Sektoren wie die Landwirtschaft eine enorme Bedrohung dar und erzeugen ein komplexes Netz an negativen Auswirkungen. Sie können in jeder Klimazone auftreten, unabhängig davon, ob es sich um ein Gebiet mit gewöhnlich hohen oder tiefen Niederschlagsmengen handelt, und zeichnen sich durch verringerte Niederschlagsmengen über einen längeren Zeitraum aus. Temperaturen, starke Winde, die relative Luftfeuchtigkeit, der Niederschlagstypus sowie dessen zeitliches Auftreten sind wichtige Kriterien zur

Bestimmung von Dürren (Wilhite & Glantz, 1985). Bei Dürren handelt es sich nicht nur um ein physikalisches Phänomen, sondern auch um das Wechselspiel zwischen Wasserbedarf und Wasserverfügbarkeit von und für Organismen (Vogt et al., 2018). Aufgrund von Bevölkerungswachstum und der stetigen Ausweitung der industrialisierten Landwirtschaft ist der globale Wasserbedarf konstant gestiegen und Wasserknappheit kommt an den meisten Orten der Welt in regelmässigen Zeitabständen vor. Weitere Faktoren, wie der Klimawandel oder die Wasserverschmutzung durch Chemikalien, haben zusätzlich zur Wasserknappheit beigetragen. In den letzten Jahrzehnten ist an vielen Orten der Welt ein Anstieg der Häufigkeit sowie des Schweregrads von Dürre- und Flutereignissen zu verzeichnen (Andreadis & Lettenmaier, 2006). Dürren beeinflussen Oberflächen und Grundgewässer und führen unter anderem zu einer generellen Verringerung der Wasservorräte, einer Verschlechterung der Wasserqualität, Ernteaussfällen, Störungen der Uferlebensräume, zu einer verringerten Leistung von Wasserkraftwerken und der negativen Beeinflussung einer Reihe ökonomischer und sozialer Aktivitäten (Karl & Riebsame, 1989).

Die Gründe für das Auftreten von Dürren sind vielschichtig, da sie nicht nur von atmosphärischen Bedingungen abhängen, sondern auch von hydrologischen Prozessen, durch die Feuchtigkeit in die Atmosphäre abgegeben wird. Sobald trockene hydrologische Bedingungen gegeben sind, setzt der positive Feedback-Mechanismus von Dürren ein, bei welchem Oberböden an Feuchtigkeit verlieren und dadurch die Leistung der Evapotranspiration verringert wird, wodurch die relative Luftfeuchtigkeit abnimmt. Je tiefer die relative Luftfeuchtigkeit ist, desto geringer ist das Niederschlagspotenzial, da es umso schwieriger wird, Sättigungsbedingungen eines lokalen Tiefdruckgebiets zu erzielen. In diesen Fällen können lediglich externe meteorologische Störungen genügend Feuchtigkeit von aussen in das betroffene Gebiet bringen, um ausreichend Niederschlag zu erzeugen und die Dürrebedingungen aufzuheben (Bravar & Kavvas, 1991). Menschliche Aktivitäten haben einen enormen Einfluss auf das Auftreten von Dürren, vor allem durch Überbewirtschaftung von landwirtschaftlichen Nutzflächen, exzessive Bewässerung, Abholzung und Erosion. Durch all diese Faktoren wird die Wasseraufnahmekapazität des Bodens massiv verringert.

Es gibt grundsätzlich vier Hauptkategorien von Dürre. Die Kategorien haben zwar unterschiedliche Ursachen, deren Folgen sind jedoch sehr ähnlich. Abhängig davon, in welchem Teil des Wasserzyklus der Mangel an Wasser besteht, können laut dem Intergouvernemental Panel on Climate Change (IPCC) folgende vier Kategorien von Dürre definiert werden (Douville et al., 2021): meteorologische Dürre, hydrologische Dürre, sozio-ökonomische Dürre und landwirtschaftliche Dürre. Aufgrund des Schwerpunkts dieser Arbeit auf Kultivierungspraktiken in der Landwirtschaft wird im Folgenden nur eine Definition von landwirtschaftlicher Dürre formuliert: Landwirtschaftliche Dürre ist charakterisiert durch eine signifikant verringerte Bodenfeuchte. Die direkten Folgen sind Wasserstress für die Vegetation mit negativen Auswirkungen auf den Ernteertrag und die Produktion von Biomasse (Vogt et al., 2018). Die Ursache für diese Art von Dürre ist nicht immer mangelnder Niederschlag, sondern

ist oftmals auch auf mangelhafte Planung oder Umsetzung von landwirtschaftlichen Kultivierungspraktiken zurückzuführen. Die Folgen davon sind Bodenerosion und eine starke Verringerung der Wasserkapazität des Bodens (Spaeth, 1978).

Die Auswirkungen von Dürre und die Reaktion von Pflanzen auf Wasserstress auf Pflanzen- und Gesamtkulturebene sind äusserst komplex. Trockenheit kann eine schlechte Keimung und eine beeinträchtigte Keimlingsentwicklung verursachen (Farooq et al., 2009). Das Pflanzenwachstum beruht auf Zellteilung, Zellvergrösserung und Differenzierung. Durch den Verlust des Turgors werden die Mitose und das Zellwachstum beeinträchtigt, was zu Pflanzenwachstumsstörungen führt (Fahad et al., 2017). Die Entwicklung der Blätter hängt vom Turgor, der Konzentration von Nährstoffen sowie den Kohlenstoffassimilaten ab, die alle durch Dürrebedingungen reduziert werden, weshalb Dürrestress zu einer Abnahme der Blattgrösse und -anzahl führt. Ernteerträge werden durch Abnahme der Fotosyntheserate ebenfalls negativ beeinflusst. Die Wassernutzungseffizienz steigt bei Dürrebedingungen bei Feldfrüchten wie Weizen, während sie bei anderen Arten, beispielsweise Kartoffeln, abnimmt (Kahiluoto et al., 2019). Für die Aufnahme von Nährstoffen aus dem Boden und für den Transport von Nährstoffen durch die Pflanze wird Wasser benötigt. Dürrebedingungen schränken diese Funktionen ein, was ebenfalls zu Wachstumsstörungen führt. Trockenstress verursacht auch eine Abnahme der fotosynthetischen Aktivität in Pflanzen aufgrund der Verringerung des fotosynthetischen Gewebes, des Verschlusses der Stomata und der verringerten Leistung der fotosynthetischen Mechanismen. Diese Verringerung der fotosynthetischen Aktivität trägt zur Reduktion des Pflanzenwachstums und der Erträge bei. Ein weiterer Faktor, der das reduzierte Pflanzenwachstum und die Erträge beeinflusst, ist die Ressourcenverteilung. Nach Dürrestress weisen die Pflanzen den Wurzeln mehr Ressourcen zu, um die Wasseraufnahme zu unterstützen, wodurch das Wurzelwachstum gesteigert und das Wachstum anderer Pflanzenteile verringert wird. Sinkende Ernteerträge sind eine direkte Konsequenz dieses Effekts (Farooq et al., 2009).

1.1.1 Dürreminderungsmaßnahmen

Um Trockenstress in der Landwirtschaft vorzubeugen, gibt es eine Reihe an verschiedenen Massnahmen, welche bei Erfolg zu einer Verringerung der Konsequenzen von Dürreeffekten führen. Die Dürremaßnahmen lassen sich grundsätzlich in drei verschiedene Kategorien aufteilen (Karavitis et al., 2014): (i) wasserversorgungsorientierte Massnahmen, (ii) wasserbedarfsorientierte Massnahmen und (iii) Massnahmen zur Minimierung der Auswirkungen von Dürren. Mögliche Gegenmassnahmen zu landwirtschaftlicher Dürre sind: Einsatz von Bewässerungstechniken oder Effizienzsteigerung bestehender Bewässerungssysteme (Hornbeck & Keskin, 2014), Einsatz dürrerotoleranter Saatgutsorten (Simtowe et al., 2019), Anpassung der Anbaumenge (Soh & van Ginkel, 2014), wasserkonservierende landwirtschaftliche Kultivierungspraktiken wie Mulchen oder Dämme (Uwizeyimana et al., 2018), Züchtung von dürreresistenten Pflanzensorten (Nuccio et al., 2018), Trockentoleranz durch die

Verwendung von Nanopartikeln (Saxena et al., 2016), Verwendung von Superabsorbent, Hydrogele und Bio-Kohle (Saha et al., 2020), Einsatz von pflanzenwachstumsfördernden Rhizobakterien (Ahluwalia et al., 2021).

Selbst wenn eine meteorologische Dürre mit einer erheblichen Verringerung von Niederschlägen auftritt (Hayes et al., 2012), kann eine tatsächliche landwirtschaftliche Dürre weitgehend verhindert werden, wenn Dürremassnahmen vorbeugend ergriffen werden und eine Bodenfeuchte erhalten werden kann, welche den Anforderungen des Pflanzenwachstums entspricht (Van Loon et al., 2016). Eine nachhaltige Feuchtigkeitsaufnahmekapazität des Bodens lindert die Folgen von Dürre, verbessert den Ernteertrag und erhöht die Wasserproduktivität der Pflanzen (Hornbeck & Keskin, 2014).

Das in dieser Arbeit vorgestellte Keyline-Design deckt alle drei Kategorien von Dürreminderungsmaßnahmen ab, da der Fokus bei dieser Methode auf ein möglichst effizientes Wassermanagementsystem gelegt wird. Dies beinhaltet die Maximierung der Wasserretentionskapazität des Oberbodens, was zu einer Reduktion des Wasserbedarfs führt (P. A. Yeomans, 1973).

1.2 Gewässerverschmutzung

Die Emission von Nähr- und Schadstoffen aus der Landwirtschaft in Schweizer Oberflächengewässer stellt ein weiteres aktuelles Umweltproblem dar und wird als mögliche Eintragsquelle diskutiert (BAFU & BLW, 2016). Durch das Stoffflussmodell MODIFFUS¹ wurden Stickstoff- und Phosphoreinträge aus diffusen Quellen in Schweizer Gewässer berechnet (Prasuhn et al., 2016). Diese betragen 14 % beim Stickstoff und 6 % beim gelösten Phosphor. Insbesondere kleine Fließgewässer sind sehr stark belastet. Viele dieser Mikroverunreinigungen stammen aus der Landwirtschaft und geraten durch diffuse Eintragswege in die Gewässer (Braun et al., 2015).

1.2.1 Drainagesysteme

Durch den Einsatz von Drainagen² wird LN direkt und ungefiltert in Oberflächengewässer entwässert. Drainagen stellen somit einen Kurzschluss zum Gewässer dar, durch welchen Nährstoffe sowie Pflanzenschutzmittel und deren Metaboliten³ in die Oberflächengewässer gelangen, denn nur selten führen Drainagen in die Mischwasserkanalisation (Prasuhn et al., 2018). Es existieren leider nicht für alle Schweizer Kantone Geodatenätze zu Drainageflächen und die vorhandenen Geodaten variieren in

¹ Das Modell zur Abschätzung diffuser Stoffeinträge in die Gewässer ist ein mesoskaliges Emissionsmodell, mit dem die Stickstoff- und Phosphoreinträge aus diffusen Quellen (Abschwemmung, Erosion, Auswaschung etc.) in die Gewässer berechnet werden können (Prasuhn et al., 2016).

² Konventionelles Wassermanagement in der Landwirtschaft, welches auf eine schnelle Entwässerung von Nutzflächen durch die Drainagesysteme gerichtet ist.

³ Metaboliten sind Substanzen, die als Zwischenstufen oder als Abbauprodukte bei Stoffwechselvorgängen von Organismen entstehen.

ihrer Ausführung und Qualität stark. Mittels Machine Learning⁴ wurde eine schweizweite Karte erstellt, in welcher Flächen abgebildet werden, die aufgrund von Standorteigenschaften das Potenzial aufweisen, drainiert worden zu sein (Prasuhn & Koch, 2021). Laut dieser Studie sind ungefähr 25 % der landwirtschaftlich genutzten Flächen in der Schweiz mit hoher Wahrscheinlichkeit drainiert. Über den tatsächlichen Zustand und das Alter der Drainagen ist nur sehr wenig bekannt und bei vielen der drainierten Flächen stellt sich somit die Frage, ob die Drainage überhaupt noch funktioniert. Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, dass Sackung und damit verbundene Bodenverdichtung des Terrains die Funktionsfähigkeit des Drainagesystems beeinträchtigen und somit früher oder später eine Alternativlösung oder eine weitgehende Erneuerung der Drainagesysteme notwendig sein wird, um die Produktionsfähigkeit der betroffenen LN gewährleisten zu können.

1.3 Zielsetzung der Arbeit

In dieser Arbeit wird vor dem Hintergrund der aufgezeigten Problematik der Gewässerverschmutzung, der landwirtschaftlichen Dürre und der Unklarheit über den Zustand der Schweizer Drainagesysteme und deren Folgen auf die Nahrungsmittelproduktion, die Wassermanagementstrategie Keyline-Design als möglicher Lösungsansatz untersucht. Dieser Ansatz wird an vielen Orten der Welt praktiziert, hat jedoch in der Wissenschaft bisher nur sehr wenig Beachtung erhalten. Das Ziel ist es, auf Basis bereits vorhandener Literatur zu dieser Thematik eine Übersicht zum Thema Keyline-Design zu schaffen und ein Fazit aus den vorhandenen wissenschaftlichen Studien zur Effektivität von Keyline-Design als Wassermanagementstrategie in der Landwirtschaft zu ziehen. Es sollen Praxisbeispiele aufgezeigt werden, in welchen Keyline-Design umgesetzt wurde. Die genaue Vorgehensweise zur Erstellung von Keyline-Mustern wird dabei gemäss der Originalliteratur und anhand heute gängiger Methoden beschrieben und miteinander verglichen. Darüber hinaus sollen im Rahmen einer Fallstudie auf Basis der Rechercheergebnisse auf ausgewählten LN mittels GIS⁵ Karten mit modellierten Keyline-Mustern erstellt werden.

Im nachfolgenden Kapitel wird auf Basis der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Literaturrecherche die Entstehungsgeschichte des Konzepts Keyline-Design erläutert und der heutige Forschungsstand zur Effektivität von Keyline-Design untersucht. Ausserdem werden die Bestandteile von Keyline ausführlich erklärt, es werden zwei Fallbeispiele vorgestellt und auf Basis der Informationen aus persönlicher Kommunikation mit Keyline-Praktizierenden wird eine heute gängige Methode zur Erstellung von Keyline-Mustern beschrieben.

⁴ Informatiksysteme, die auf Basis eines grossen Datensatzes eigenständig künstliches Wissen erlangen.

⁵ Geoinformatiksysteme

2 Theorie Keyline-Konzept

2.1 Ursprung

Keyline-Design wurde vom Australier P. A. Yeomans (1904–1984) in den späten 1940er- und 1950er-Jahren als praktische Antwort auf die unvorhersehbaren Regenmuster in Sydney, Australien entwickelt. Es stellt ein alternatives Bewirtschaftungs- und Planungskonzept dar, welches zum Ziel hat, fruchtbaren Boden in einer langfristig nachhaltigen Landschaft zu fördern sowie den Oberflächenabfluss zu optimieren. Yeomans verwendete ursprünglich Bodenschutzstrategien, die vom US Army Corp of Engineers entwickelt wurden, erkannte jedoch sehr bald Lücken im Bereich des Wassermanagements. Er schlug vor, Landschaftsmuster zu schaffen, welche das Speichern von Regenwasser fördern, um Landschaften möglichst über das ganze Jahr hinweg dürre- und brandresistent halten zu können (P. A. Yeomans, 1958b). P.A. Yeomans Konzepte wurden von ihm in vier verschiedenen Büchern veröffentlicht: «The Keyline Plan» (1954), «The Challenge of Landscape» (1958b), «Water For Every Farm» (1973) und «The City Forest» (1971).

2.2 Forschungsstand

Die Thematik Keyline-Design hat bisher nur wenig akademische Aufmerksamkeit erhalten und es gibt nur eine geringe Anzahl an wissenschaftlichen Studien welche fundierte Aussagen über die Effekte von Keyline-Systeme machen.

Über die Suchmaschine Swisscovery⁶ konnte zum Suchwort «Keyline-Design» ein einziger Wissenschaftlicher Artikel gefunden werden: «Keyline in Bean Crop (*Phaseolus vulgaris* L.) for Soil and Water Conservation» (del Carmen Ponce-Rodríguez et al., 2021). In dieser Arbeit wurden die Eigenschaften Bodenfeuchtigkeit, Bodenerosion und Ertragsmengen eines Bohnenfelds mit umgesetztem Keyline-Design mit einer Kontrollgruppe verglichen. Gemäss der aus dieser peer-reviewed Arbeit gewonnen Erkenntnisse stellt Keyline-Wassermanagement eine effiziente Boden- und Wasserkonservierungsmethode in der Landwirtschaft dar. Durch den Einsatz von Keyline-Design konnte auf der Versuchsfläche nachweislich Wasser gleichmässiger verteilt und Bodenerosion verringert werden. Die Erträge der Versuchskultur konnten gegenüber der Kontrollfläche durchschnittlich um 25 % erhöht werden und der Einsatz von Keyline in Kombination mit organischen Düngemitteln birgt laut aktuellen Erkenntnissen ein grosses Potenzial zur Verringerung des ökologischen Fussabdrucks im Bereich der biologischen Produktion von Nahrungsmitteln. Der Boden wurde gemäss Keyline-Prinzipien im entsprechenden Muster gepflügt und die Kulturen wurden dem

⁶ Nationale Plattform, welche wissenschaftliche Informationen aus rund 490 Bibliotheken der Schweiz zusammenführt.

Muster nach ausgerichtet. Über die genaue Vorgehensweise und darüber, welche Geräte zum Pflügen verwendet wurden, sind keine Informationen bekannt.

Die Suchmaschine Ovid⁷ ergab zusätzlich zum bereits erwähnten Artikel einen weiteren Treffer, welcher sich in der wissenschaftlichen Datenbank Agricola⁸ befindet: «Keyline Water Management, Field Research & Education in the Capital Region» (Duncan & Krawczyk, 2018). Im Rahmen dieses zweijährigen Forschungsprojekts ging es spezifisch darum, die Wirkung des Keyline-Pflugs zu prüfen. Die Resultate der Studie zeigten leichte, jedoch nicht signifikante Verbesserungen auf den mit Keyline-Pflug bearbeiteten Flächen. Zu den festgestellten Verbesserungen gehören eine erhöhte Wasserkapazität des Oberbodens während der Trockenzeit, eine verbesserte Wasserinfiltrationsrate bei Niederschlagsereignissen von über 4 mm innerhalb eines Zeitraums von 24 Stunden, eine Erhöhung der Durchwurzelungstiefe bei grober Bodentextur und eine Verringerung des Durchdringungswiderstands des Bodens sowie eine Erhöhung des organischen Kohlenstoffs, nicht jedoch des aktiven Kohlenstoffs. Gemäss den Autoren und Autorinnen dieser Studie ist die limitierte Aussagekraft der Versuchsergebnisse jedoch unter Umständen darauf zurückzuführen, dass die Versuchsfelder keine starken Bodenverdichtungen vorwiesen, weshalb weitere Forschungsarbeiten notwendig sind. Weiterhin limitierten die permanent angebrachten Bodensensoren den mehrmaligen Einsatz des Keyline-Pflugs, obwohl in der Praxis oft dreimal jährlich gepflügt wird.

Über die Suchmaschine MDPI⁹ konnte eine weitere relevante Arbeit gefunden werden: «Modelling the Effect of Keyline Practice on Soil Erosion Control» (Giambastiani et al., 2023). In dieser Arbeit wird die Modellierung des Effekts eines Keyline-Systems auf zwei Flussbecken von ungefähr 100 ha Grösse vorgenommen. Die Vergleichsanalyse der Kalkulationsmodelle Topographic Wetness Index (TWI) und SIMulated Water Erosion (SIMEW) zeigten beide signifikante Verbesserungen der mit Keyline modellierten Flächen in Bezug auf Bodenerosionsminderung und Verteilung von Oberflächenabfluss. Als Fazit dieser Studie lässt sich schliessen, dass Keyline-Design eine effektive Wassermanagementstrategie darstellt, um die Wasserkapazität von Böden bei Dürrebedingungen zu verbessern.

2.3 Grundgedanke

Die zentrale Idee des Wassermanagements von Keyline besteht darin, oberflächlich abfliessendes Niederschlagswasser bewusst zu verlangsamen, im Boden versickern zu lassen und eine möglichst gleichmässige Verteilung dessen zu erzielen (Abb. 2). Erreicht wird dies durch die aktive Verringerung von Bodenverdichtungen und die Umleitung von Oberflächenabfluss zu trockeneren

⁷ Anbieter von bibliografischen und Volltextdatenbanken im medizinischen und akademischen Bereich.

⁸ Bibliografische Datensätze der National Agricultural Library des U.S. Department of Agriculture.

⁹ Multidisciplinary Digital Publishing Institute ist ein Herausgeber von wissenschaftlichen Open-Access-Fachzeitschriften.

Landschaftsabschnitten. Dazu werden vereinzelt oder in Kombination folgende zwei Techniken angewandt: mittels Keyline-Pflug angelegte Pflugfurchen und Kultivierungslinien, welche leicht von den Konturlinien ausgehend ab- oder aufsteigend angelegt sind; künstliche Hügel und Staudämme an strategisch günstigen Standorten, welche bei Bedarf auch zur aktiven oder passiven Bewässerung verwendet werden können. Während in der konventionellen Landwirtschaftspraxis üblicherweise unterirdische Drainagesysteme verwendet werden, um LN zu entwässern, wird selten aktiv versucht, den Oberflächenabfluss auf trockenere Zonen zu verteilen. Bei einer erfolgreichen Umsetzung von Keyline besteht das Potenzial, Niederschläge, welche Richtung Tal fließen, zu puffern und Überschwemmungsrisiken bis zu einem gewissen Grad zu verringern. Die Infiltrationsfläche des abfließenden Wassers wird maximiert und der direkte Zugang von abgeschwemmten, potenziell schädlichen Stoffen der LN in naheliegende Gewässer wird verringert. In dieser Hinsicht agiert Keyline-Design als Überschwemmungs-, Dürreminderungs- sowie Naturschutzstrategie.

Keyline verändert den topografieabhängigen Abfluss von Niederschlag, indem dieser verlangsamt und seitlich verteilt wird. Wie in Abbildung 1 ersichtlich ist, bildet Oberflächenabfluss natürlicherweise eine S-förmige Kurve und das Wasser läuft gebündelt den geringsten Weg des Widerstands rechtwinklig zu den Konturlinien den Hang hinunter. Wird der Wasserfluss jedoch gebremst und werden mittels Keyline Wassergräben, Pflugfurchen oder Pflanzreihen in die gewünschten Richtungen gelenkt, führt dies zu einer gleichmässigeren Verteilung und Vergrößerung der Infiltrationsfläche (Abb. 2).

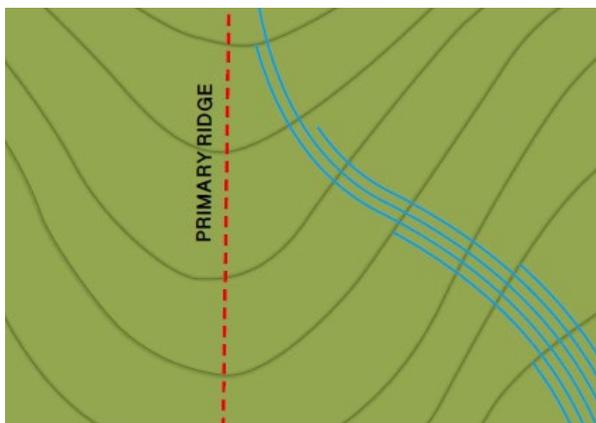


Abbildung 1: Natürliche Bündelung von Oberflächenabfluss (Quelle: Perkins, 2019)

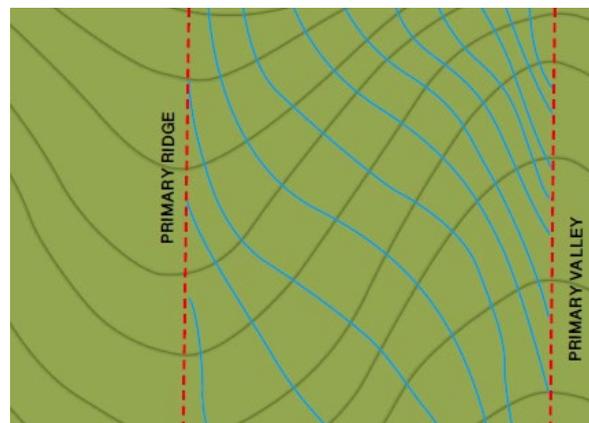


Abbildung 2: Gleichmässige Verteilung von Oberflächenabfluss mittels Keyline-Design (Quelle: Perkins, 2019)

Der Einsatz von Keyline-Design als Wassermanagementstrategie wurde ursprünglich dazu entwickelt, die Erträge von Futterpflanzen auf Weiden zu steigern (P. A. Yeomans, 1954). Adaptiert auf heutige Verhältnisse, verfügt Keyline über das Potenzial, die Wassernutzungseffizienz vieler anderer Produktionssysteme zu verbessern. Nachfolgend werden einige Beispiele solcher Systeme genannt: Nutztierhaltung auf Weiden, Agroforst- und Forstwirtschaft, Obstgärten, silvopastorale Weiden,

Gemüseproduktion und Renaturierungsprojekte. Wie bereits erwähnt, liegt der primäre Fokus von Keyline-Wassermanagement durch die räumliche Anlegung von Gräben, Pflugfurchen oder Pflanzreihen nach geometrischem Keyline-Muster darauf, den Oberflächenabfluss zu verlangsamen und auf eine möglichst grosse Fläche versickern zu lassen. Der sekundäre Fokus von Keyline ist die Bildung von Oberboden mit einer möglichst hohen Wasserkapazität. Der Grundgedanke des Erfinders P. A. Yeomans bestand darin, den Niederschlag an der höchstmöglichen Stelle der LN abzufangen und ihn mittels Schwerkraft sanft nach aussen zu den trockeneren Seitenkämmen zu leiten sowie, je nach Bedarf und Möglichkeit, Wasserspeicherobjekte an vorteilhaften Standorten anzulegen, wo diese aktiv oder passiv für Irrigationszwecke verwendet werden können.

2.4 Gesamtkonzept

Der Autor P. A. Yeomans beschrieb das Keyline-Konzept erstmalig in dessen Gesamtheit in seinem 1958 veröffentlichten Buch «The Challenge of Landscape». Mittels einer von ihm erschaffenen Skala, der «Scale of Permanence» listete er alle wichtigen Faktoren auf, welche einen Landwirtschaftsbetrieb charakterisieren und klassifizierte diese nach deren Beeinflussbarkeit und dem mit ihnen verbundenem Veränderungsaufwand.

«In order to plan the development and management of land, the many factors that are involved should be related in some logical order. The planning of one aspect cuts across others, so some must have preference. Decisions have to be made on all sorts of apparently conflicting items of land planning. We need also to have an aim or an object, a basic plan.» (P. A. Yeomans, 1954, S. 34)

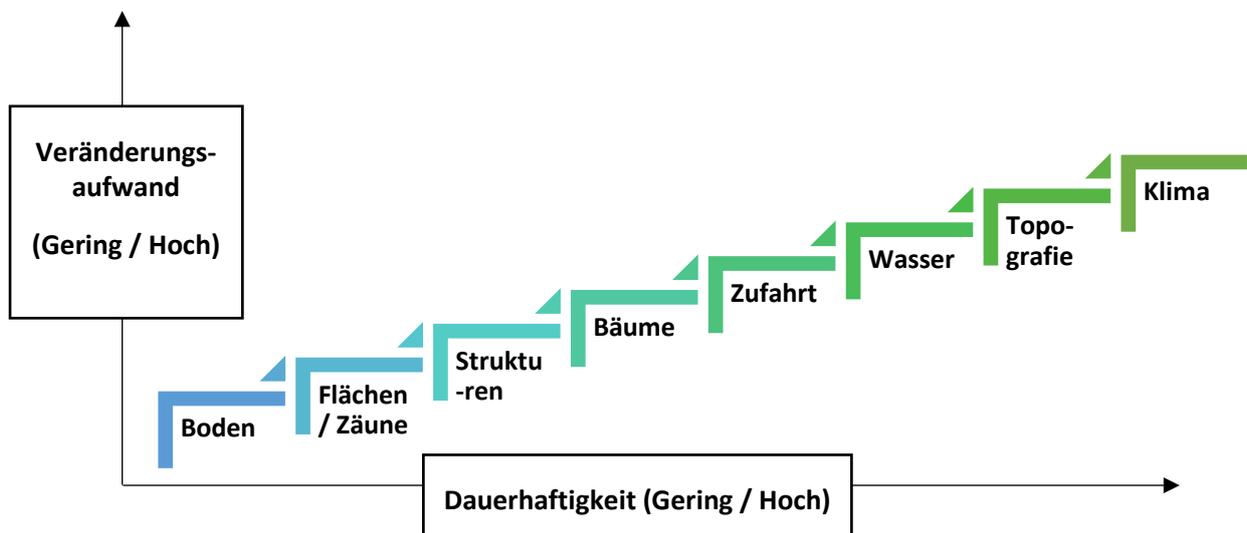


Abbildung 3: Yeomans' «Scale of Permanence»

Es folgt eine Interpretation der «Scale of Permanence» von oben nach unten: Das Klima sowie die topografischen Eigenschaften eines Standorts lassen sich von Menschenhand nicht ohne Weiteres ändern, obwohl mit kleineren oberflächigen Eingriffen gewisse Änderungen an der Topografie

vorgenommen werden können. Die Menge an Wasser, die einem Standort zur Verfügung steht, ist eine natürliche Funktion der Beziehung zwischen Klima und topografischen Eigenschaften, obwohl mit Anpassungen an letztere mehr Niederschlag zurückgehalten werden kann. Zugangswege und -strassen sind dauerhafte Merkmale und bleiben üblicherweise länger bestehen als Bäume und Gebäude. Unterteilungszäune überdauern in der konventionellen Landwirtschaft oftmals Böden; diese können jedoch mittels nachhaltiger Massnahmen und bei idealen Bedingungen gemäss Yeomans innert kürzester Zeit regeneriert werden.

2.5 Begriffserklärung Keyline

Im Rahmen dieser Arbeit wird das Wort Keyline in verschiedenen Kontexten verwendet. Je nach Gebrauchsform kann sich Keyline auf das Keyline-Konzept in dessen Gesamtheit beziehen, auf eine einzelne Keyline, welche als Ausgangslage zur Erstellung von Kultivierungsmustern dient, oder auf das Keyline-Muster selbst. P. A. Yeomans definierte in seinem Buch «The Australian Keyline Plan for the Enrichment of Human Settlements"» (P. A. Yeomans, 1976, S. 5 f) das Wort «Keyline» folgendermassen:

«Keyline relates to a special feature of topography namely, the break of slope that occurs in any primary valley. Primary valleys are the highest series of valleys in every water catchment region and lie on either side of a main or water divide ridge. They are widely observed as the generally smooth or grassed over valleys of farming and grazing land but are often overlooked and disguised in the city. On either side of the primary valley is a primary ridge. Of the three basic shapes of land, namely, main ridge, primary valley and primary ridge, the primary valley shape occupies the smallest area of land and the primary ridge shape, the largest. In the rural situation irrigation is a matter of watering the large primary ridge shapes, even on land which appears flat [...]».

Im Zitat werden diverse Begriffe erwähnt, welche im Zusammenhang mit den geomorphologischen Eigenschaften typischer Hügellandschaften in Australien stehen und im folgenden Abschnitt erklärt werden. Das Verständnis dieser Begriffe wird für die Erstellung eines Keyline-Musters nach klassischer Vorgehensweise vorausgesetzt.

2.6 Keyline-Muster

Das Keyline-Muster gibt die räumliche Ausrichtung vor, in welcher die LN bearbeitet wird. Ausgehend von den Keypoints werden die Keylines eingezeichnet, welche in angepasster Form als Leitlinien für das Versetzen von Parallellinien dienen und am Ende des Vorgangs das Keyline-Muster ergeben. Die Pflanzen- bzw. Pflugreihen, welche in den Seitenkämmen von der Konturlinie aus abfallend und in Seitentälern aufsteigend angelegt sind, wirken als Mikro-Speichergräben und helfen durch Auflockerung, die Wasserkapazität des Bodens zu verbessern. Das Ziel besteht darin, verdichteten

Boden auf schonende Weise aufzulockern und neue Wege und mehr Oberfläche für das Wasser zu schaffen, damit es besser versickern oder in die gewünschten Richtungen abfließen kann.

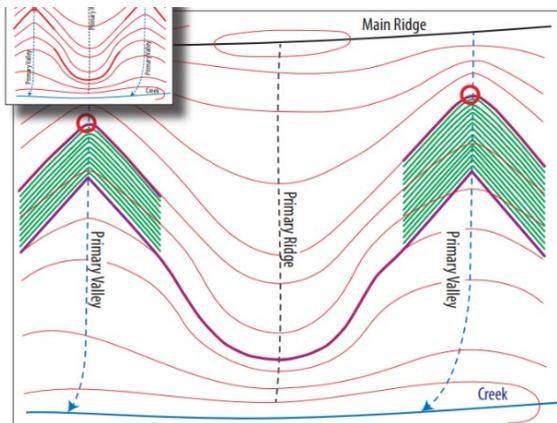


Abbildung 4: Mittels Konturlinien, Keypoints und Keylines wird die Leitlinie (lila) ermittelt, welche als Ausgangspunkt zur Erstellung des Keyline-Musters dient (Quelle: Doherty & Jeeves, 2015)

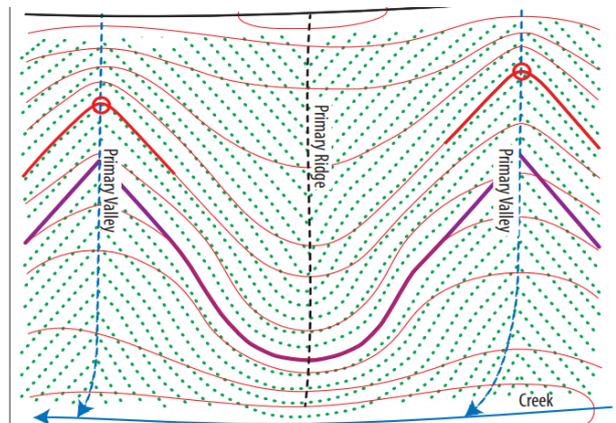


Abbildung 5: Anhand der Leitlinie (lila) werden Parallellinien hangaufwärts und -abwärts versetzt und ergeben das Keyline-Muster (grün) (Quelle: Doherty & Jeeves, 2015)

2.6.1 Grundelemente

Um Keyline-Geometrieprinzipien verstehen zu können, sind Kenntnisse über die von P. A. Yeomans definierten drei Grundelemente topografischer Geländeeigenschaften notwendig (Abb. 6) (P. A. Yeomans, 2008, S. 28ff): (1) Hauptkämme (Main Ridges), (2) Seitenkämme (Primary Ridges) und (3) Seitentäler (Primary Valleys).

«The complete understanding, classification and use of the shapes of land for agricultural advantage is, along with climate, the basic structure of Keyline.» (P. A. Yeomans, 1954, S. 44)

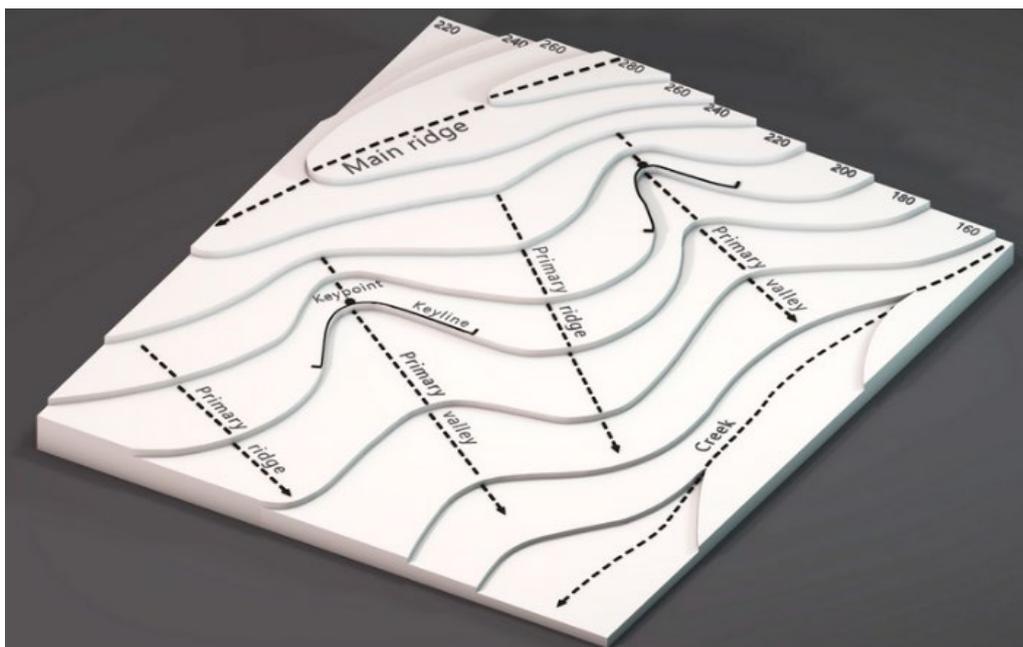


Abbildung 6: Geomorphologische Eigenschaften nach P. A. Yeomans (Pavlov, 2015)

Als *Hauptkamm* (Primary Ridge) wird die Gratlinie bezeichnet, welche über die höchsten Erhebungen eines Gebirges führt. Der Hauptkamm trennt das Einzugsgebiet auf natürliche Weise und ist der höchste sichtbare Geländepunkt am Horizont. Hauptkämme werden durch Sattel bzw. Pässe voneinander getrennt (P. A. Yeomans, 1958b, S. 34ff).

Die *Seitenkämme* (Primary Ridges) und *Seitentäler* (Primary Valleys) fallen vom Hauptkamm aus seitlich ab und münden in *Haupttäler* (Secondary Valleys), in welchen sich gewöhnlich Bäche oder Flüsse befinden. Das *Seitental* befindet sich zwischen zwei *Seitenkämmen* und das Haupttal beschreibt eine seltenere Formation, in welcher eine Reihe von Seitentälern in ein grösseres Tal ohne Wasserlauf mündet.

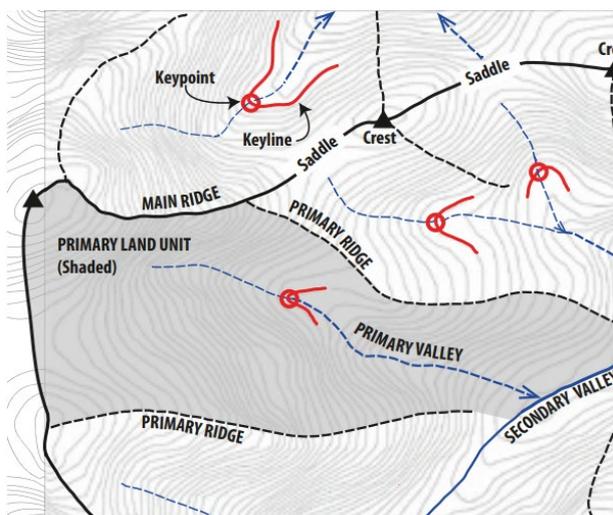


Abbildung 7: Primäre Landschaftseinheit abgebildet in dunkelgrau (Quelle: Doherty & Jeeves, 2015)

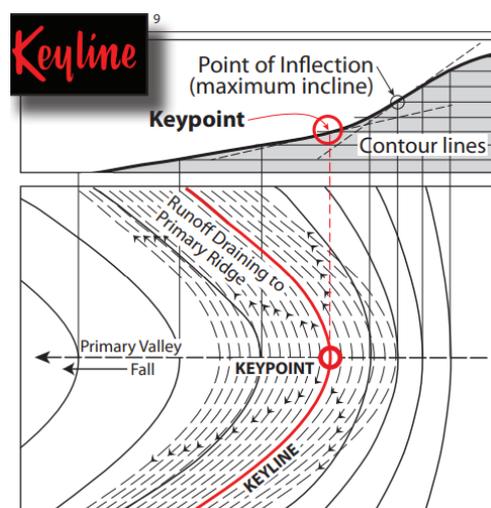


Abbildung 8: Querschnitt (oben) mit Keypoint und Wendepunkt der Hangneigungskurve. Übersicht (unten) des Keypoints und der Keyline mit der Fliessrichtung vom Oberflächenabfluss (Quelle: Doherty & Jeeves, 2015)

Das *Seitental* fällt beidseitig an jedem Sattel des Hauptkamms ab und bildet nach Keyline-Prinzipien das kleinste Einzugsgebiet. Es wird durch die Seitenkämme beidseitig eingegrenzt, welche zusammen mit dem Hauptkamm die Wassertrennlinien darstellen. Am unteren Ende befindet sich das Haupttal. Das hier beschriebene Einzugsgebiet nennt sich *primäre Landschaftseinheit* (Primary Land Unit) (Abb. 7).

Um Keyline-Elemente nach klassischer Methode auf einer Landschaft platzieren zu können, müssen die *Keypoints* (dt.: Schlüsselpunkte) bekannt sein, welche sowohl in den Satteln des Hauptkamms als auch in den Seitentälern vorzufinden sind. Grundsätzlich stellen Keypoints die erste Stelle dar, an welcher sich abfließendes Niederschlagswasser zu einem Bach bündelt. Im Sattel befindet sich der Keypoint im Scheitelpunkt der Senke und im Seitental in der Mittellinie des Tals an der Stelle, an welcher die Hangneigung von konkav zu konvex übergeht. Der Keypoint des Primärtals ist oftmals die Stelle, an welcher die Sedimentation anfängt oder die erste Stelle, oberhalb welcher abfließendes

Niederschlagswasser bei Aufhören des Regens verschwindet, sofern es nicht künstlich zurückgehalten wird.

Wie die Keypoints, so kommen auch die Keylines in Satteln und Seitentälern vor. Die *Keyline* durchkreuzt den *Keypoint* als Konturlinie und endet am Scheitelpunkt der Höhenkurve, wo die Kammformation anfängt.

2.7 Gewässerordnungszahl nach Horton-Strahler

In der Geomorphologie und Gewässerkunde wird durch die Flussordnungszahl der Grad der Verzweigung in einem Gewässernetz angegeben. Arthur Newell Strahler (1952) und Robert E. Horton (1945) entwickelten eine weitverbreitete Methode, nach welcher Flüsse oder Bäche erster Ordnung die äussersten Zuflüsse sind – im vorliegenden Fall die Bäche, welche sich in den Keypoints der Sattel und Seitentäler bündeln. Fliessen nun zwei dieser Bäche beispielsweise in einem Haupttal zusammen, ergibt sich ein Zusammenfluss, welchem eine Ordnungszahl gegeben wird, die einen Wert höher liegt. Falls zwei Gewässer mit unterschiedlichen Flussordnungszahlen zusammenfliessen, überträgt sich die höhere auf das daraus resultierende Gewässer. Diese Strahlenordnung wurde für die Morphologie von Fliessgewässerräumen entworfen und bietet die Grundlage vieler wichtiger hydrographischer Indikatoren, beispielsweise dem Verzweigungsverhältnis, der Flussdichte oder der Flusshäufigkeit. Als Basis dient die Wasserscheidelinie des Einzugsgebiets, welche jedoch vom gewählten Massstab abhängig ist. Aufgrund der Eignung dieser Methode für kleinräumigere Strukturen werden die in dieser Arbeit erwähnten Flussläufe nach der Horton-Strahler-Methode klassifiziert.

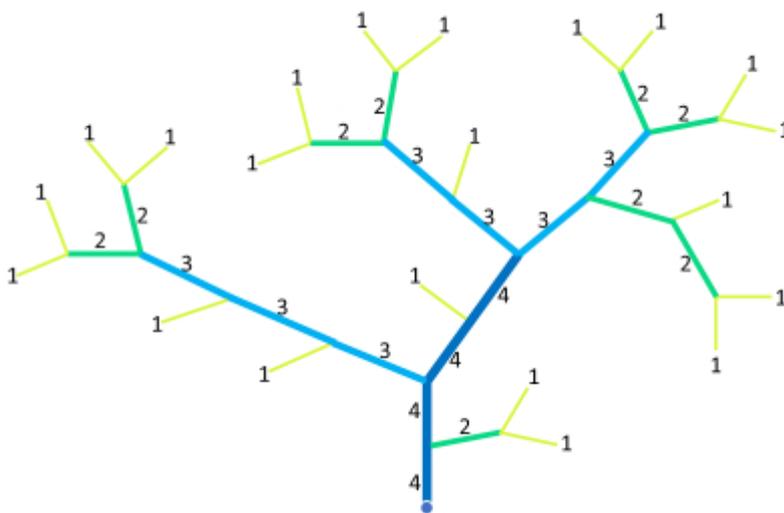


Abbildung 9: Flussordnungszahlen nach Horton-Strahler (Quelle: *Entropy rates for Horton self-similar trees*, 2018)

2.8 Wasserspeicherkörper

Keyline-Design wurde ursprünglich für den Einsatz in ariden Klimazonen entworfen, in welchen die Anlegung künstlicher Dämme und Bewässerungskanäle zur Wasserspeicherung von grossem Nutzen

ist. P. A. Yeomans unterschied im Rahmen von Keyline drei Typen von Wasserobjekten: Staudämme, natürliche sowie künstliche Wasserlinien (P. A. Yeomans, 2008, S. 8f). Keyline-Staudämme werden bei den Keypoints der Sattel oder Seitentäler platziert, wo sie aufgrund der Wasserzufuhr optimal mit Wasser versorgt werden. Mit künstlichen Wasserlinien sind Swales¹⁰ gemeint. Natürliche Wasserlinien sind beispielsweise Flüsse oder Bachläufe, welche auf natürliche Art und Weise in der Landschaft vorkommen.

Weiter wurde im Rahmen von P. A. Yeomans Keyline-Konzept das Flood-Flow-Bewässerungssystem entwickelt, welches eine möglichst flächendeckende Bewässerung ermöglichen soll. Mittels eines Rohrs, welches durch die Basis von Staumauern verlegt wird, kann die Irrigationsmenge und der Zeitpunkt der Irrigation beliebig gesteuert werden. Mit Flood-Flow können beispielsweise Weideflächen überflutet werden, welche zuvor durch den Keyline-Pflug bearbeitet wurden (P. A. Yeomans, 2008, S. 88 ff).

2.9 Keyline-Pflug

Das Keyline-Pflügen des Bodens ist eine der zentralen Methoden innerhalb des Keyline-Designs. Dabei wird der Boden möglichst schonend bis zu einer maximalen Tiefe von ungefähr 5 cm unterhalb des bereits vorhandenen Wurzelwerks gepflegt, ohne die Bodenschichten vertikal umzukehren. Die Tiefe kann von Jahr zu Jahr in versetzten Streifen stufenweise erhöht werden. Wie oft und wie lange die Tiefenlockerung durchgeführt werden soll, ist situationsbedingt und oftmals abhängig vom Schweregrad der Bodenverdichtung. Das primäre Ziel ist es, durch die Anlegung der Furchen den Oberflächenabfluss zu bremsen und umzulenken, die Infiltrationsfläche zu vergrößern, Bodenverdichtungen aufzuheben und durch das Ermöglichen aerober Bedingungen bis in tiefere Bodenschichten die Regeneration der organischen Bestandteile des Oberbodens zu fördern. Wichtig bei der Bodenbearbeitung ist die Wahl des richtigen Zeitpunkts, um negative Folgen wie zusätzliche Bodenverdichtung oder Schmierschichten zu vermeiden. Idealerweise sollten unmittelbar nach dem Pflügen Wärme und etwas Feuchtigkeit gegeben sein. Das Pflügen wird im Idealfall durch den Einsatz einer speziell angefertigten Tiefenmeissel durchgeführt, der ‹Yeomans Plow› aus Australien (Abb. 10). Der Import dieser Maschine aus Übersee sowie die erschwerte Ersatzteilbesorgung aufgrund mangelnder Verfügbarkeit können ein Problem darstellen. Statt der Yeomans Plow können auch andere Typen von Tiefenmeisseln verwendet werden. Dabei ist zu beachten, dass diese grünlandtauglich sind und eine geeignete Scharform haben, wie dies beispielsweise beim Grasnarbenlockerer der Firma Evers der Fall ist (Abb. 11). Das Verwenden von ungeeigneten Typen von Tiefenlockerern kann zu Unebenheiten durch Aufhebungen im Feld führen, welche möglichst vor Frostbeginn gewalzt werden

¹⁰ Gräben, welche zur Bewässerung und Wasserumleitung genutzt werden.

sollten, um Störungen zu vermeiden. Aus diesem Grund sind die beiden nachfolgend vorgestellten Tiefenlockerer mit Walzen ausgestattet.



Abbildung 10: Originale Yeomans Plow aus Australien, produziert durch die Firma YEOMANS PLOW Co. Pty Ltd (Quelle: yeomansplow.com.au)



Abbildung 11: Europäische Alternative der Yeomans Plow, produziert durch die Firma Evers AG (Quelle: eversagro.de)

Auf Weiden soll durch Tiefenlockerung die Wurzeltiefe von Futterpflanzen erhöht werden, indem der Wurzelzugang in die von Tiefenmeißeln bearbeiteten Mikrofurchen ermöglicht wird. Es wird angenommen, dass durch das Fördern einer tiefgründigeren Wasser- und Wurzelaktivität als vor der Behandlung über Wurzelausscheidungen und Bodenmikroorganismen eine Kohlenstoffspeicherung bis in tiefere Bodenschichten erzielt werden kann und die Regeneration des Bodens damit beschleunigt wird.

2.10 Vorgehensweise Erstellung Keyline-Muster

In diesem Kapitel wird auf Basis einer Literaturrecherche und persönlicher Kommunikation mit dem Landwirtschaftsberater Georgi Pavlov¹¹ die Vorgehensweise beschrieben, wie Keyline-Muster auf klassische und auf moderne Art erstellt werden, welche Art von Daten dazu notwendig sind und wie diese zum gewünschten Zweck aufbereitet werden können.

2.10.1 Informationsbeschaffung

Folgende Informationen in Form von Raster- oder Vektordaten des Projektgebiets sind zur Erstellung eines Keyline-Musters notwendig: Luft- oder Satellitenbild, DOM oder DHM in möglichst hoher Auflösung, Katasterinformationen, Landnutzungsinformationen.

Folgende auf *map.geo.admin.ch* öffentlich verfügbaren Karten können weitere aufschlussreiche Informationen in Bezug auf die Standortgerechtigkeit und detaillierte Gestaltung eines Keyline-Musters geben: Gewässeranschlusskarte, Anschlusswahrscheinlichkeit (Bundesamt für Landwirtschaft BLW), Feldblockkarte zum Erosionsrisiko (Bundesamt für Landwirtschaft BLW), digitale Bodeneignungskarte der Schweiz – Wasserspeichervermögen (Bundesamt für Landwirtschaft BLW), digitale Bodeneignungskarte der Schweiz – Wasserdurchlässigkeit (Bundesamt für Landwirtschaft BLW), digitale Bodeneignungskarte der Schweiz – Skelettgehalt (Bundesamt für Landwirtschaft BLW), Erosionsrisikokarte des Ackerlandes, mittlerer Bodenabtrag in Tonnen/(ha*Jahr) (Bundesamt für Landwirtschaft BLW), monatliche Erosionsrisikokarten des Schweizer Dauergrünlands, mittlerer Bodenabtrag in Tonnen/(ha*Monat), (BAFU), monatliche Niederschlagserosivitätskarten (R-Faktor) der Schweiz in $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{h}^{-1} \text{Monat}^{-1}$, (BAFU), Fliesswegkarte zum Erosionsrisiko (Bundesamt für Landwirtschaft BLW), Gefährdungskarte Oberflächenabfluss (Bundesamt für Umwelt BAFU), topografische Einzugsgebiete Schweizer Gewässer: Teileinzugsgebiete 2 & 40 km^2 (Bundesamt für Umwelt BAFU), Bewässerungsbedürftigkeit (Bundesamt für Landwirtschaft BLW), Hanglagen (Bundesamt für Landwirtschaft BLW).

2.10.2 Höhenlinienintervall

Die Höhenlinien des Geländes sind zur Erstellung des Keyline-Musters von zentraler Bedeutung. Um möglichst gute Voraussetzungen für das Zeichnen der Keyline-Muster zu schaffen, ist die optimale Wahl eines geeigneten Höhenlinienintervalls wichtig. Je nach Neigungsgrad der ausgewählten Fläche, soll ein passendes Höhenlinienintervall gewählt werden. Abbildung 12 zeigt das zu wählende Höhenlinienintervall abhängig vom Hangneigungsgrad der ausgewählten Fläche oder des Flächenabschnitts.

¹¹ Gründer der Beratungsfirma Huma Design, welche seit 2015 erfolgreich bei der Umsetzung von Keyline-Projekten Unterstützung bietet.

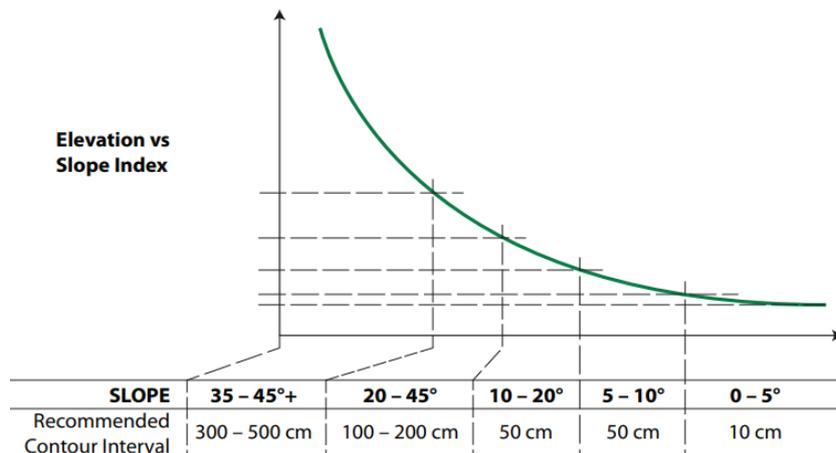


Abbildung 12: Empfohlenes Höhenlinienintervall abhängig vom Hangneigungsgrad (Quelle: Doherty, 2015)

2.10.3 Klassische Vorgehensweise

Mittels Keyline-Muster werden Pflanz- und Pflugreihen sowie Keyline-Retentionsbecken und Swales angelegt. Keyline-Design wurde ursprünglich für das aride australische Klima mit dessen abgerundeten Geländeformationen entwickelt. Die in *Kapitel 2.6* beschriebenen geografischen Formationen sind nicht in jedem Projektgebiet auffindbar. Nachfolgend wird Schritt für Schritt erklärt, wie man ein Keyline-Muster einzeichnet, wenn die typischen Keyline-Geländeformationen Hauptkamm, Seitenkamm und Seitental auf der gewünschten Fläche identifiziert werden können. Sollten die beschriebenen Geländeformationen nicht erkennbar sein, wie dies gemäss Richard Perkins (2019, 87 ff) in den meisten Fällen ausserhalb Australiens der Fall ist, kann ein Keyline-Muster in vereinfachter Vorgehensweise erstellt werden, wie im nachfolgenden *Unterkapitel 2.10.4* detailliert beschrieben.

Die im Folgenden vorgestellte Methode zur Erstellung eines Keyline-Musters nach der klassischen Methode von Yeomans (1958a) ist in Anlehnung an Doherty und Jeeves (2015) beschrieben:

1. *Markieren der Keylines:* Nachdem die primären Geländeformationen Hauptkamm, Seitenkamm und Seitental identifiziert wurden, können die Keypoints ermittelt und anschliessend die zugehörige Konturlinie bis zur Kante des Seitenkamms markiert werden.

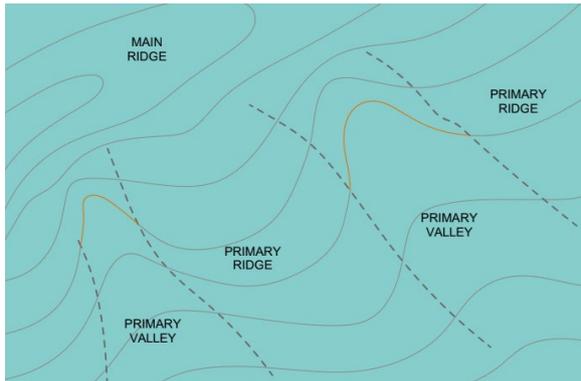


Abbildung 13: Erstellung Keylines – erster Schritt

2. *Vervollständigung der Leitlinie:* Die am tiefsten gelegene Konturlinie, welche an das Primärtal angrenzt, ohne es zu schneiden, wird eingezeichnet und parallel dazu hangaufwärts versetzt, bis die beiden Enden sich mit den im vorherigen Schritt eingezeichneten Keylines treffen.

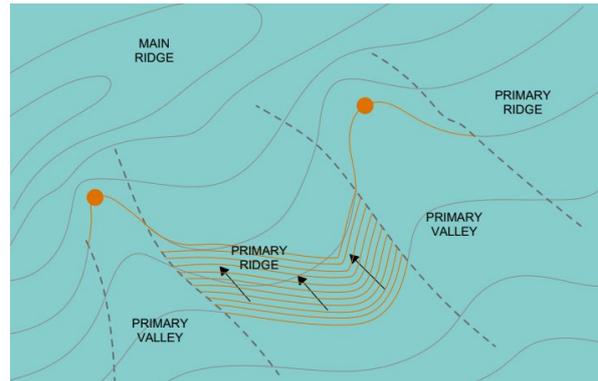


Abbildung 14: Erstellung Keylines – zweiter Schritt

3. *Hangabwärts versetzen:* Die nun vorliegende Leitlinie wird hangabwärts versetzt.

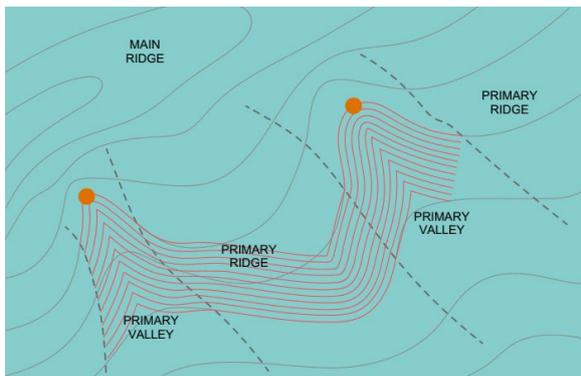


Abbildung 15: Erstellung Keylines – dritter Schritt

4. *Hangaufwärts versetzen:* Statt abwärts, wird nun hangaufwärts versetzt, um das Muster zu vervollständigen.

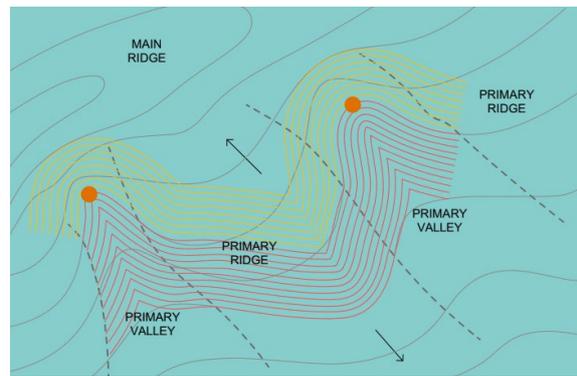


Abbildung 16: Erstellung Keylines – vierter Schritt

Das resultierende Muster besteht nun aus Linien, welche vom Seitental absteigend zur Mitte des Seitenkamms angelegt sind, um den Oberflächenabfluss dorthin zu leiten. Falls die Kurvenwinkel im weiteren Verlauf des Versetzens der Leitlinie zu steil für die maschinelle Bewirtschaftung werden (Abb. 18), ist es notwendig, entsprechende Anpassungen vorzunehmen (Abb. 19). Dies ist bei einer Erstellung des Musters in steileren und spitzkantigeren Geländeformationen wie denen der Schweiz von hoher Wahrscheinlichkeit.

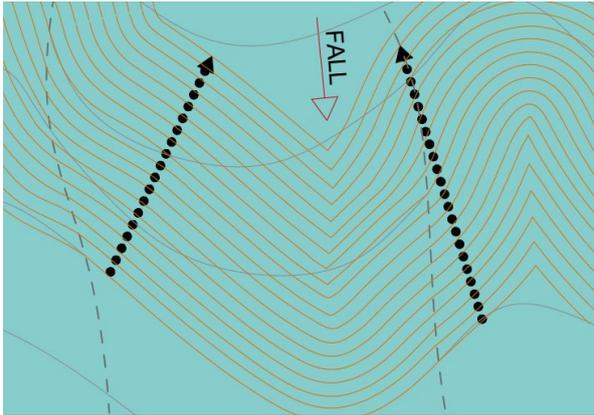


Abbildung 17: Graduelle Verschärfung des Kurvenradius



Abbildung 18: Korrektur zu scharfer Kurvenradien

2.10.4 Moderne Vorgehensweise

Technische Hilfsmittel, wie sie heute bekannt sind, waren zu Zeiten von Yeomans noch nicht verfügbar. Vermessungswerkzeuge waren noch nicht so ausgereift, wie sie es heute sind, und GPS-Technologie existierte noch nicht. In der heutigen Zeit lässt sich das von Yeomans entwickelte Keyline-Muster mit einer Reihe von neuen Werkzeugen einfacher und effizienter umsetzen. Durch die Unterstützung moderner Werkzeuge erübrigt sich weitgehend die Notwendigkeit der Identifikation von Keypoints und Keylines zur Erstellung des Keyline-Musters. Obwohl Keypoints ein zentraler Bestandteil von Yeomans Grundidee sind, dienen diese heutzutage im Wesentlichen nur noch zum Platzieren von Wasserkörpern wie Dämmen.

«I am more than ever convinced that keypoints are irrelevant. It was a very useful concept once upon a time, no denying that, and I think there's still merit to learning it if for no other reason than to pay homage to the genius of P.A. Yeomans. But with our highly accurate topographic maps and extremely sophisticated modern software which allows us to predict the geometric relationship between the pattern and the underlying landscape, we don't need to concern ourselves with keypoints.» (Georgi Pavlov, persönliche Kommunikation, 4. November 2022)

Nachfolgend wird, angelehnt an Georgi Pavlov (2015) und dessen Zusammenarbeit mit Darren J. Doherty (2015), eine an die heutige Zeit angepasste Methode aufgezeigt, welche auch auf Flächen anwendbar ist, auf denen die primären topografischen Geländeeigenschaften, wie sie von P. A. Yeomans beschrieben wurden, nicht vorhanden sind. Diese Methode wurde durch Richard Perkins (2019) auf seinem Landwirtschaftsbetrieb «Sunne Kommun» umgesetzt und die einzelnen Schritte werden verständnishalber mit kommentierten Abbildungen der Umsetzung der Schritte auf zwei Feldern durch Perkins begleitet:

1. Eingrenzung der Fläche: Um die Komplexität zu minimieren, sollte der Landschaftsabschnitt, auf dem das Keyline-Kultivierungsmuster eingezeichnet werden soll, möglichst früh eingeschränkt werden. Zuerst werden alle Flächen markiert, welche nicht bewirtschaftet werden können (z. B. Steilhänge,

Waldabschnitte und Biodiversitätsförderflächen). Ebenfalls wichtig zu beachten sind die Vorgewende¹², welche von Maschinen benötigt werden, um am Ende der Reihen wenden zu können. Für solche Räume sollte eine zwei- bis vierfache Maschinenbreite am äusseren Rand jeder Feldfläche eingeplant werden.

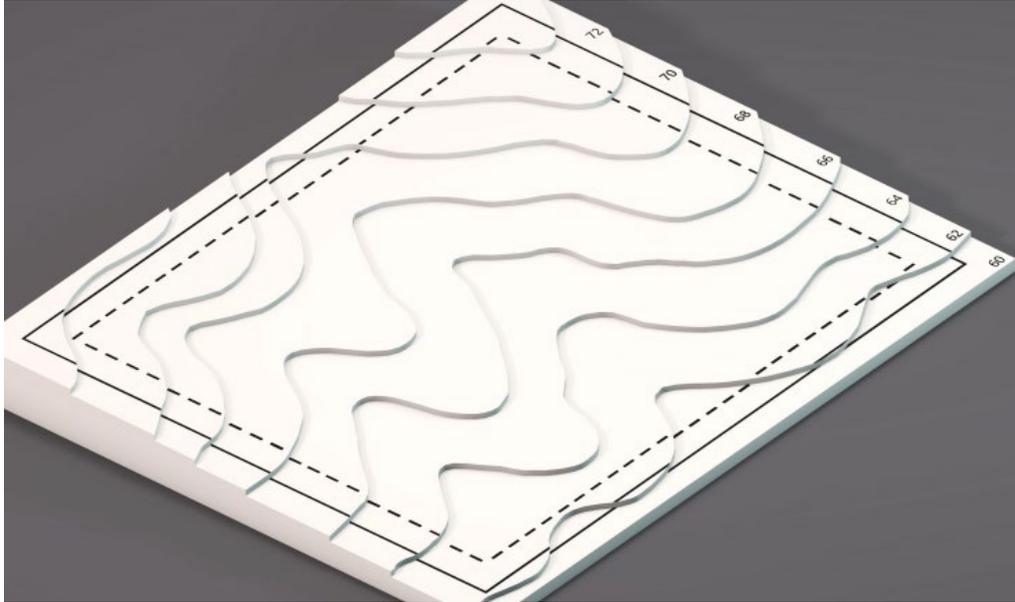


Abbildung 19: Markierung Feldgrenze und Vorgewende (gestreift) (Quelle: Pavlov, 2015)



Abbildung 20: Feldgrenze (rot) und nutzbare Fläche (lila)
Feld A (Quelle: Perkins, 2019)



Abbildung 21: Feldgrenze (rot) und nutzbare Fläche (lila)
Feld B (Quelle: Perkins, 2019)

In den Abbildungen 21 und 22 sind die zwei Felder A und B zu sehen, auf welchen die in *Schritt 1* erwähnte Eingrenzung markiert wurde. Im linken Feld, welches als Weidefläche geplant ist, wurde mittels roter Linie die Feldgrenze eingezeichnet und die Fläche, auf welcher schlussendlich das Keyline-Muster erstellt werden soll, wurde lila markiert. Entfernt wurde zu steiles Gelände im südlichen

¹² Als Vorgewende wird der Randbereich eines Felds bezeichnet, auf dem bei der Bearbeitung mit dem Traktor gewendet wird.

und östlichen Teil sowie Vorgewende für die Traktoren. Im rechten Feld sind Nussbäume geplant. In der Mitte des Felds wurde mittels grüner Farbe ein sumpfiger Teil des markiert, welcher für Baumpflanzung und Bodenbearbeitung mittels Keyline-Pflug nicht geeignet ist. Auch hier wurde Vorgewende für die Traktoren an den Feldrändern abgezogen.

2. Identifizieren von Geländeanomalien: Im Idealfall sollten einzelne LN eine möglichst geringe Anzahl an unterschiedlichen Mustern haben. Dies ist abhängig von der Geländetopografie, welche je nach Gebiet stark variieren kann. Geländeanomalien wie kleine Rinnen und Vertiefungen sind weitgehend unbedeutend und können ignoriert werden. Wenn Tal- bzw. Kammformen jedoch ihre Grundrichtung signifikant ändern, werden zwingend mehrere Keyline-Kultivierungsmuster notwendig sein, um eine Fläche vollständig abdecken zu können. Deshalb ist es hilfreich, bereits vor dem Erstellen des Musters einzuschätzen, in wie viele Teilgebiete sich die Fläche aufteilt.

In Feld A (Abb. 23) wurden nebst dem für Traktoren ungeeigneten Steilhang, welcher bereits abgezogen wurde, auch im nördlichen Teil topografische Anomalien identifiziert, welche jedoch aufgrund ihrer geringen Dimensionen und der relativ insignifikanten Veränderung zum Rest des Feldes als zu wenig relevant eingeschätzt wurden, um hierfür ein neues Muster zu schaffen. In Feld B (Abb. 24) sieht die Situation aufgrund des Hügels in der Mitte etwas komplexer aus. Das kleine Flächenstück im nordwestlichen Teil wurde aufgrund der geringen Arbeitsfläche ausgesondert. Auf den ersten Blick ergibt sich hier eine Aufteilung in zwei verschiedene Muster.



Abbildung 22: Geländeanomalie in Feld A (Quelle: Perkins, 2019)



Abbildung 23: Geländeanomalien in Feld B (Quelle: Perkins, 2019)

3. Erstellen der Leitlinie: Im nächsten Schritt wird eine Höhenlinie ausgewählt, welche sich in der Mitte des Feldes befindet und sich möglichst breitflächig erstreckt. Ausgehend von dieser Höhenlinie wird eine Leitlinie nach Keyline-Geometrieprinzipien erstellt. Die Mittelpunkte der Seitentäler müssen höher gelegen sein als die Mitte der angrenzenden Seitenkämme. Die Kurven werden bewusst ignoriert

und deren Winkel an diesem Punkt nicht näher beachtet, um die Komplexität möglichst gering zu halten. Zu einem späteren Zeitpunkt können die Winkel innerhalb eines gewissen Spielraums noch angepasst werden.

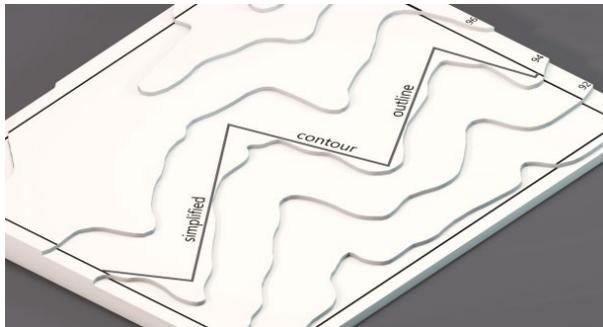


Abbildung 24: Beispiel einer vereinfachten Konturlinie unter Einhaltung der Keyline-Geometrieprinzipien (Quelle: Pavlov, 2015)

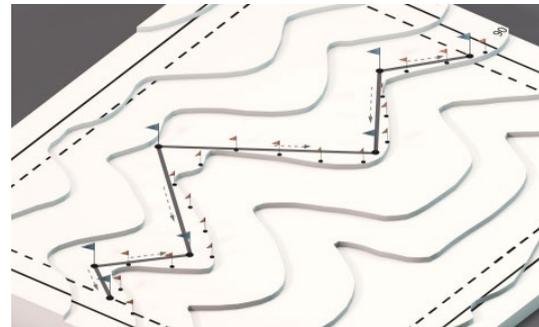


Abbildung 25: Reduktion von Datenpunkten einer Höhenkurve (rote Fahnen) zu einer vereinfachten Linie (blaue Fahnen) (Quelle: Pavlov, 2015)

Die Leitlinie in Feld A (Abb. 27) wurde mittig angelegt und über die Feldgrenze hinaus erweitert, um das Auf- und Abwärtsversetzen der Parallellinien möglichst über die Gesamtfläche hinweg zu vereinfachen, ohne diese anschliessend erweitern zu müssen. In Feld B (Abb. 28) wurde die Leitlinie ebenfalls erweitert, um möglichst viel Spielraum im Verlauf des Versetzens der Linien zu gewähren.



Abbildung 26: Leitlinie (lila) in Feld A (Quelle: Perkins, 2019)



Abbildung 27: Leitlinie (hellblau) in Feld B (Quelle: Perkins, 2019)

4. Versetzen der Parallellinien: Ausgehend von der Leitlinie werden nun mittels Kopierfunktion Parallellinien eingezeichnet und seitlich versetzt. Der Prozess wird durch die Verschärfung der Winkel beim Versetzen von Parallellinien erschwert. Um die maschinelle Bewirtschaftung mit fest vorgegebener Breite und Lenkradius zu gewährleisten, wird ein Muster mit einheitlichen Reihenabständen und maximalen Kurvenradien vorausgesetzt. Dazu sollte der Verlauf des Musters über die Gesamtfläche vorausgesehen werden können, bevor eine Leitlinie als definitive Ausgangslage für

das Muster definiert werden kann. Um dies zu erzielen, kann bei den Winkeln die Winkelhalbierende¹³ verwendet werden, welche den genauen weiteren Verlauf der Scheitelpunkte der Parallellinien projiziert. Die Scheitelpunkte aller voneinander versetzten Parallellinien befinden sich auf derselben Winkelhalbierenden und jeder Punkt auf der Winkelhalbierenden ist von den beiden Schenkeln, die den Winkel bilden, gleich weit entfernt. Diese Eigenschaft kann dazu genutzt werden, bereits bei der Erstellung der Leitlinie den genauen Verlauf der Parallellinien im Landschaftsabschnitt vorauszusehen, um sicherzustellen, dass die Geometrie der Parallellinien im Verhältnis zur topografischen Eigenschaft des Landschaftsabschnitts stimmt.



Abbildung 28: Verlauf winkelhalbierende Linie (gestrichelt)
(Quelle: Pavlov, 2015)

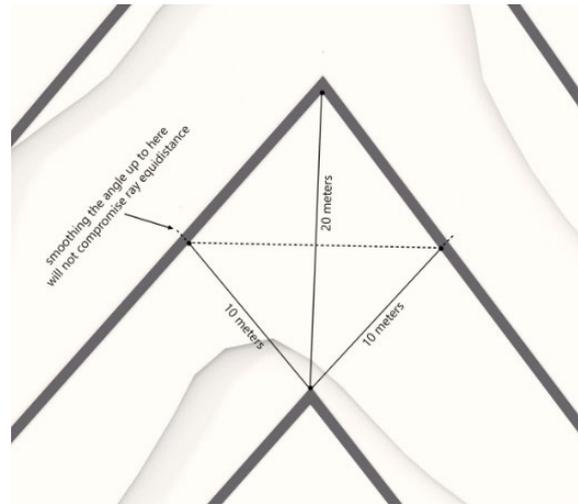


Abbildung 29: Abstände zwischen Scheitelpunkten und Schenkeln zweier Winkel (Quelle: Pavlov, 2015)

Um den Verlauf des Musters zu verändern, können die Winkel der Leitlinie ausgehend von der Winkelgeraden angepasst werden (Abb. 31). Dies kann dann notwendig sein, wenn die topografischen Eigenschaften des Landschaftsabschnitts markante Änderungen aufweisen oder der Winkelradius über den maximalen Wenderadius der eingesetzten Maschinen geht. Das Arbeiten mit der Winkelgeraden kann auch genutzt werden, um zu prognostizieren, wie viele verschiedene Muster auf einem Landschaftsabschnitt zur Abdeckung der Gesamtfläche notwendig sind (Abb. 32).

¹³ Eine Winkelhalbierende ist ein Strahl, der einen Winkel in zwei gleich grosse Hälften teilt und am Scheitelpunkt entspringt (Abb. 29)

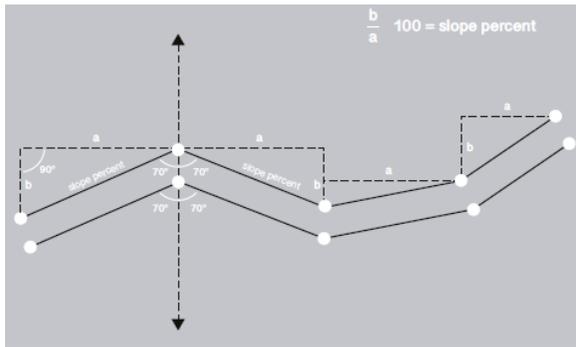


Abbildung 30: Berechnung der Winkelradien und Neigung der Schenkel (Quelle: Perkins, 2019)

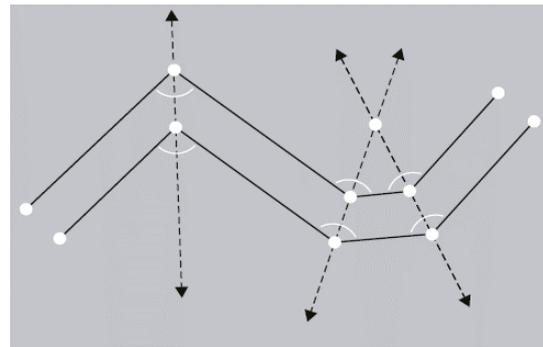


Abbildung 31: Überschnitt winkelhaltender Parallellinien (Quelle: Perkins, 2019)

Im linken Ridgedale-Feld (Abb. 33) ergab sich ein einheitliches Muster, welches ohne Komplikationen vervollständigt werden konnte. Im rechten Feld jedoch werden die Winkel während des Versetzens der Parallellinien zu steil und zu scharfkantig für eine maschinelle Bewirtschaftung und müssen deshalb in einem nächsten Schritt angepasst werden.



Abbildung 32: Vollendetes einheitliches Keyline-Muster (Quelle: Perkins, 2019)

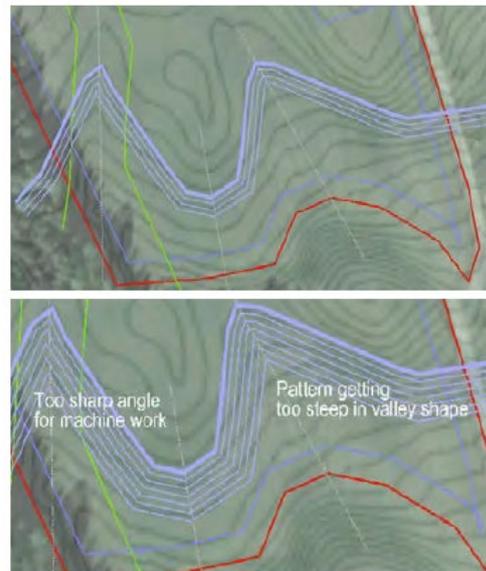


Abbildung 33: Verschärfung der Winkel im Keyline-Muster (Quelle: Perkins, 2019)

5. Lokale Anpassungen vornehmen: Im nächsten Schritt wird nochmals geprüft, ob das Muster flächendeckend von den Seitenkämmen abfallend zu den Seitentälern ausgerichtet ist und somit den Keyline-Geometrieprinzipien entspricht. Der Winkelradius sowie der Neigungsgrad der eingezeichneten Linien werden ebenfalls geprüft. In der Praxis ist ein möglichst einheitliches Muster von grossem Vorteil, weshalb kleinere Unstimmigkeiten bewusst ignoriert werden können, sofern es sich dabei um kleinräumige Bereiche handelt, welche eine Ausnahme in der Kontinuität des Musters darstellen und die maschinelle Bewirtschaftung trotz dieser Unstimmigkeiten weiterhin gewährleistet ist.

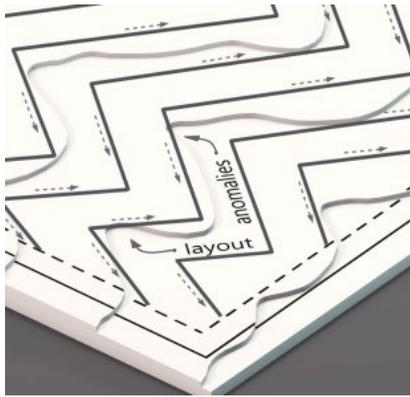


Abbildung 34: Markierung von Anomalien im Muster (Quelle: Pavlov, 2015)

«The Keyline pattern won't ever be entirely perfect in all its aspects but it's good if it's as close as it can possibly be. Sometimes one pattern is not sufficient to cover the entire landscape without compromising on its functionality too much. If the compromise is not too bad, then you might want to go ahead and prioritize simplicity. But otherwise, you must use multiple patterns while still trying to blend their geometries as seamlessly as possible so that management can be eased.»

(Georgi Pavlov, persönliche Kommunikation, 4. November 2022)

In Abbildung 36 ist ersichtlich, wie eine nach oben versetzte Parallellinie aufgrund einer starken Veränderung der Geländetopografie nicht mehr dem Keyline-Geometrieprinzip entspricht. Die Anpassung des entsprechenden Abschnitts ist in Abbildung 37 zu sehen. Sollte eine lokale Anpassung des Musters in solch einer Situation nicht ohne Weiteres möglich sein, wäre dies der Punkt, an welchem ein neues Muster zum Einsatz kommt. Die zusätzliche Fläche, welche nach der Anpassung zwischen den Scheitelpunkten entstanden ist, wird an dieser Stelle ignoriert, da diese maschinell nicht ohne Weiteres bewirtschaftet werden kann.



Abbildung 35: Markierung (orange) Unstimmigkeit Muster (Quelle: Perkins, 2019)

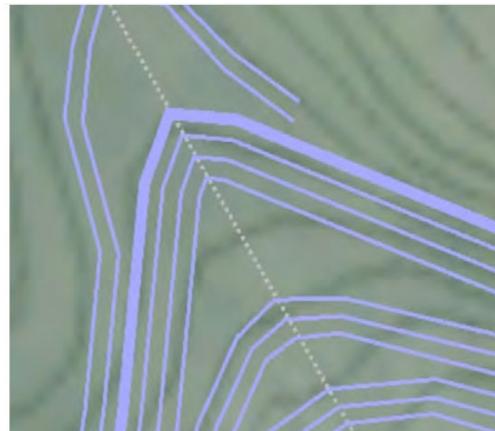


Abbildung 36: Korrektur der in Abbildung 40 gezeigten Unstimmigkeiten (Quelle: Perkins, 2019)

Wenn mit mehreren Mustern innerhalb einer einzelnen Fläche gearbeitet wird, muss auch hier beachtet werden, dass genügend Vorgewende im Übergang zu neuen Mustern einberechnet wird, damit Traktoren und andere Maschinen wenden können, ohne anliegende Reihen schneiden zu müssen. In der nachfolgenden Abbildung 38 ist ein vollständiges Keyline-Muster abgebildet, welches über zwei verschiedene Muster verfügt. Zwischen dem oberen Muster (1) und dem unteren Muster (2) wurde das Einfügen entsprechender Abstände an den Enden der Reihen umgesetzt.

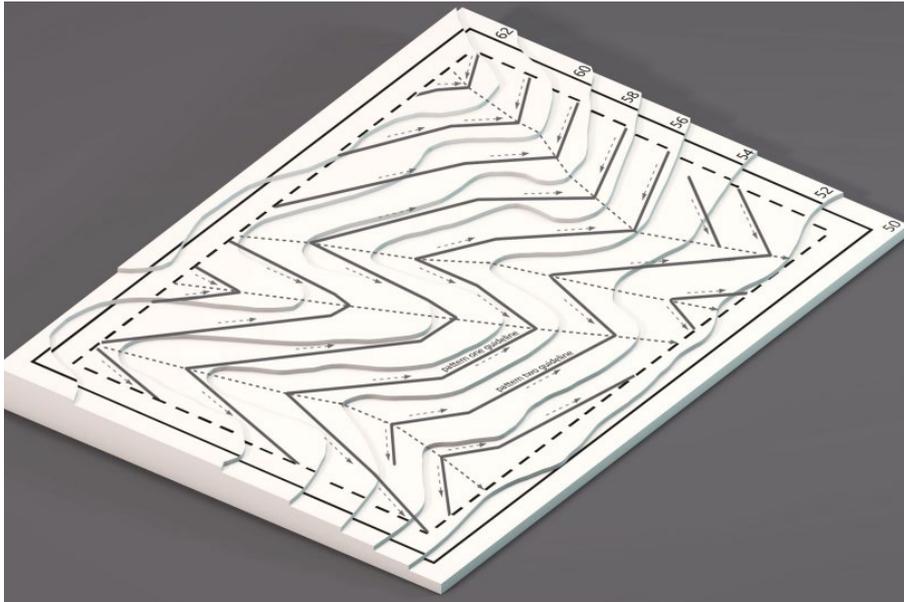


Abbildung 37: Keyline-Muster bestehend aus zwei verschiedenen Teilmustern (Quelle: Pavlov, 2015)

6. Abschluss des Musters: Das Muster ist vollständig abgeschlossen, wenn es nicht weiter vereinfacht werden kann, ohne dessen Funktionsweise einzuschränken. Ein gutes Muster zeichnet sich dadurch aus, dass es leicht zu bewirtschaften ist.

«We should not forget that, ultimately, the design goal for any patterns we intend to apply to the landscape is the ease of application and, far more importantly, the ease of management over however long a time frame it is going to be in service for. The pattern must be as simple and predictable as possible without compromising its underlying function, which in the case of Keyline is water control.» (Georgi Pavlov, persönliche Kommunikation, 4. November 2022)

Wichtige Punkte, die abschliessend geprüft werden sollten, sind: möglichst gerade Linien in einheitlichen Abständen; Forcierung von Manövern mit Traktoren an steilen Geländeabschnitten vermeiden; möglichst geringe Anzahl verschiedenartiger Muster innerhalb einer Fläche; bei Vorhandensein mehrerer Muster fließende Übergänge schaffen; simple Leitlinien, die auf dem Gelände leicht zu markieren und umzusetzen sind.

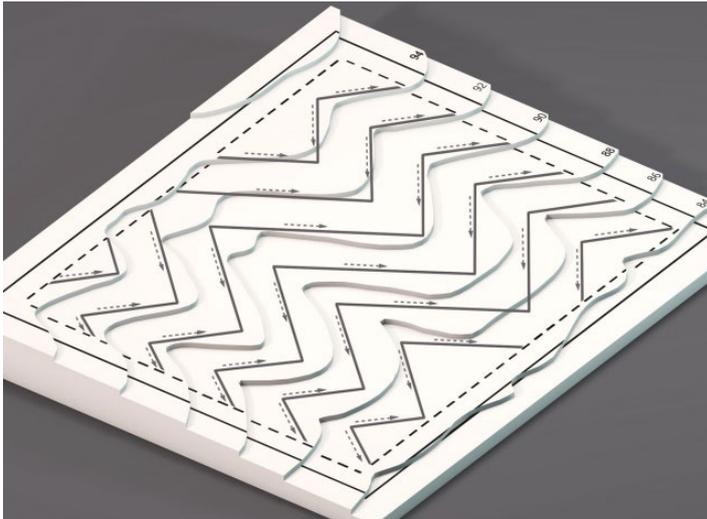


Abbildung 38: Keyline-Muster (Quelle: Pavlov, 2015)



Abbildung 39: Keyline-Muster Feld B, bestehend aus zwei Teilmustern (Quelle: Perkins, 2019)

2.10.5 Frostschutz

In bestimmten Situationen kann die Förderung von Kaltluftabfluss in den Pflanzenreihen eine vorteilhafte Strategie sein, um Schäden durch Spät- oder Frühfrost zu verhindern, wie dies oft bei Obstkulturen und Reben der Fall ist und durch den globalen Klimawandel intensiver auftritt (Kothgasser, 2018). Mittels nach Keyline-Geometrieprinzipien angelegten Pflanzenreihen wird kalte Luft zum Mittelpunkt des Hangs geführt. An dieser Stelle kann eine Unterbrechung der Pflanzenreihe dazu genutzt werden, kalte Luft abfließen zu lassen und somit Frostschäden zu minimieren. Dieser Zwischenraum kann zusätzlich auch beispielsweise als Vorgewenderraum, zur Anlegung eines Zufahrtswegs oder als Biodiversitätsförderfläche mit tiefwüchsiger Vegetation genutzt werden.

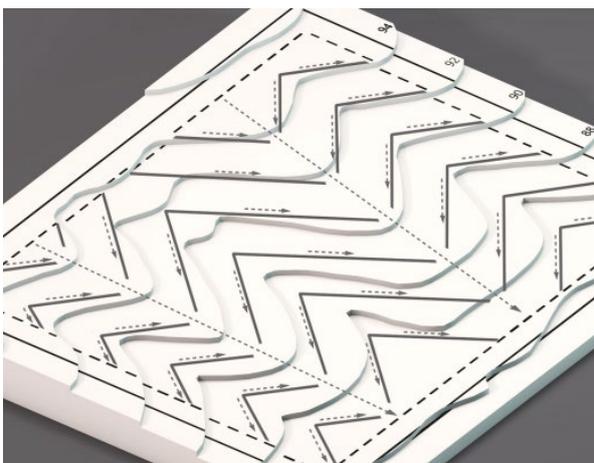


Abbildung 40: Keyline-Muster mit eingepflanzten Zwischenräumen zum Abfluss kalter Luft (Quelle: Pavlov, 2015)

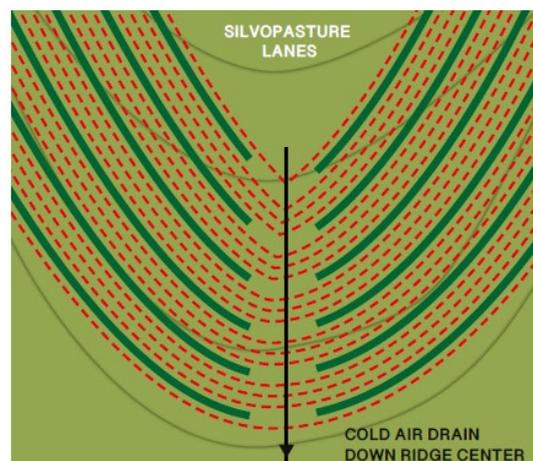


Abbildung 41: Draufsicht Keyline-Muster mit eingepflanzten Zwischenräumen zum Abfluss kalter Luft (Quelle: Perkins, 2019)

2.11 Beispiele aus der Praxis

Nachfolgend werden Erfahrungswerte der Umsetzung von Keyline-Design aus zwei verschiedenen landwirtschaftlichen Produktionsbetrieben dargestellt, in welchen die topografieabhängige Kultivierungsmustergestaltung mit den Bewirtschaftungstechniken der Agroforstwirtschaft und des holistischen Weidemanagements verknüpft wurden. Trotz der grossen Auswahl an Keyline-Projekten in mediterranen Klimazonen wie in Portugal und Spanien, fiel die Wahl auf die beiden vorgestellten Betriebe aufgrund der gemässigten Klimaverhältnisse, welche diese charakterisieren.

2.11.1 *Sunne Kommun, Ridgedale Permaculture in Västra Ämtervik (Schweden)*

Der Mitbegründer von Ridgedale Permaculture, Richard Perkins, nutzt auf seinem 10 ha grossen Landwirtschaftsbetrieb in der schwedischen Provinz Värmland Keyline-Design mit integriertem holistischem Weidemanagement als Gestaltungsplan seines Betriebs. Die im Kapitel «Gesamtkonzept» erwähnte «Scale of Permanence» legt die Grundstruktur für die betriebswirtschaftliche Planung und Gestaltung der LN basierend auf Permakultur-Prinzipien¹⁴. Das Besondere an diesem Projekt sind die eher kühlen Wetterbedingungen. Värmland verfügt über ein kontinentales Klima mit einer durchschnittlichen Jahrestemperatur von etwa 9 °C. Aufgrund dessen liegt der Fokus des Betriebs stark darauf, Mikro-Klimas und Wärmesenken in der Landschaft zu nutzen. Beispielsweise wird das nur knapp verfügbare Sonnenlicht mittels Wasserkörper an gewünschten Stellen reflektiert. Um Wasser nach der Schneeschmelze und den in diesem Gebiet regelmässig auftretenden Niederschlägen regelmässig zu verteilen sowie Vernässung oder an gewissen Stellen auch Trockenheit zu vermeiden, wird Keyline-Design als Wassermanagementstrategie eingesetzt, wo normalerweise Drainagesysteme zum Einsatz kommen. Der Fokus des Betriebs liegt in der Verbesserung der Bodenstruktur und damit in der Maximierung der Wasserkapazität. Um dies zu erreichen, wird jährlich eine Tiefenlockerung mithilfe vom Keyline-Pflug durchgeführt.

Das Grundstück umfasst 4 ha Weideland, welches als Waldweide gestaltet ist. Es wird durch artenreiche 12 m lange Baumreihen unterteilt, welche nach Keyline-Muster angelegt sind. Um Biodiversität und Lebensraumstrukturen zu fördern, wurden die Obstbäume zusammen mit einer artenreichen Mischung aus mehrjährigen Pflanzen, Nuss- und Obststräuchern sowie stickstofffixierenden Pflanzen kombiniert. Um den Nutztieren Schatten und Baumfutter anzubieten, wurden verschiedene Arten von Nussbäumen im Keyline-Muster angepflanzt.

¹⁴ Permakultur ist ein nachhaltiges Konzept für Landwirtschaft und Gartenbau, das darauf basiert, natürliche Ökosysteme und Kreisläufe in der Natur genau zu beobachten und nachzuahmen (*Projekt Fennematt - Interview mit Eide Dücker, 2020*).



Abbildung 42: Keyline-Kultivierungsmuster auf der Ridgedale Farm (Quelle:Perkins, 2019)

2.11.2 New Forest Farm in Wisconsin, USA

Die New Forest Farm in Wisconsin umfasst etwa 43 ha LN, welche aktiv bewirtschaftet wird, und wurde von Mark Sheppard und seiner Frau Jen Sheppard im Jahre 1994 gegründet. Wisconsin verfügt über ein kontinentales Klima mit einer durchschnittlichen Jahrestemperatur von etwa 11 °C. Mark ist Gründer und Präsident von Restoration Agriculture Development sowie Präsident von Forest Agriculture Enterprises. Er lehrt weltweit Agroforstwirtschaft und Permakultur und hat auch das Buch «Restoration Agriculture» geschrieben. Auf der New Forest Farm werden Bäume, Sträucher, Weinreben, Stöcke, mehrjährige Pflanzen und Pilze kultiviert, um Lebensmittel für Menschen und Tiere, Kraftstoffe, Medikamente und Schönheitsprodukte herzustellen. New Forest Farm wurde von einem typischen Monokultur-Getreideproduktionsbetrieb in ein mehrjähriges landwirtschaftliches Ökosystem verwandelt. Der Gesamtbetrieb wird vollständig mittels Solar- und Windenergie betrieben und die landwirtschaftlichen Geräte laufen mit lokal produziertem Biokraftstoff.

Keyline-Design wird als Grundlage für das Wassermanagement verwendet. Mittels Swales wird das Regenwasser aufgefangen und verteilt. Die Kultivierungsmuster sind parallel angelegt, um eine möglichst effiziente Arbeit mit den Maschinen zu ermöglichen. Der von jahrzehntelanger Überbewirtschaftung geplagte Boden konnte so innerhalb von wenigen Jahren von einem schweren Tonboden hin zu einem Boden mit krümeliger Lehmstruktur verändert werden, was wiederum zu einer besseren Wasserinfiltration führte.

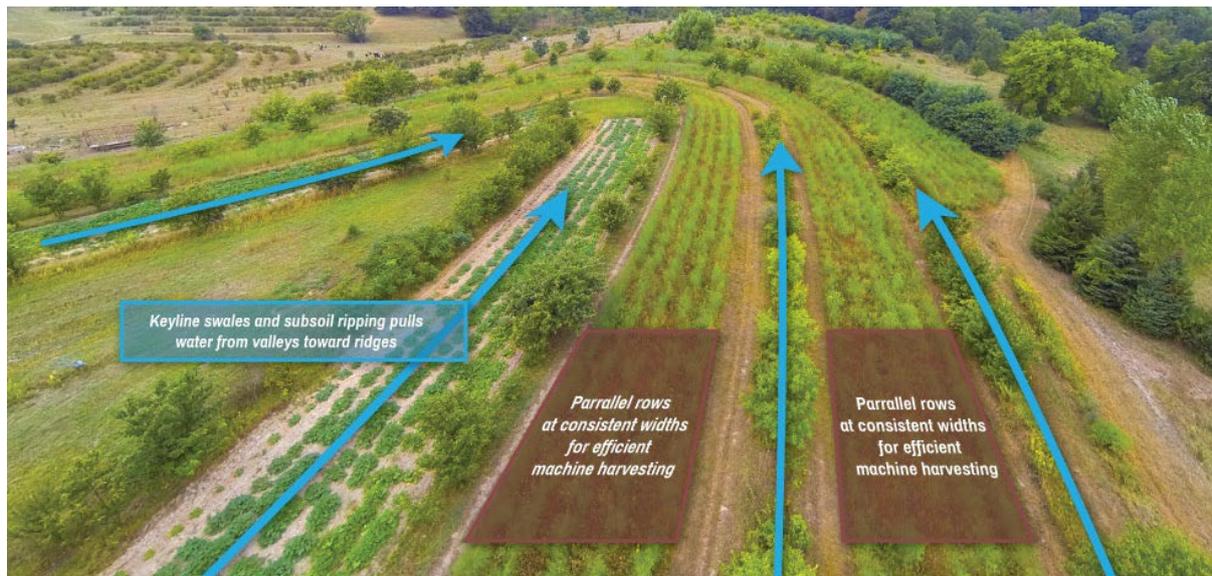


Abbildung 43: New Forest Farm in Wisconsin, USA (Quelle: newforestfarm.us)

2.12 Agroforstwirtschaft

Keyline-Design wurde auch vom Autor P. A. Yeomans als Planungsgrundlage für Agroforstsysteme verwendet. Mögliche Formen davon sind beispielsweise die Integration von Gehölzstreifen in Acker- und Weidelandschaften, die Unterteilung und Stabilisierung von Uferbänken sowie Waldbrand- und Erosionsschutz (P. A. Yeomans, 2008). Wie sich an den in *Kapitel 2.11* vorgestellten Projekten erkennen lässt, wird eine ebensolche Integration von Keyline-Wassermanagementsystemen in der Agroforstwirtschaft erfolgreich praktiziert.

Die Europäische Kommission (2013) definiert Agroforstwirtschaft als „Landnutzungssysteme, auf welchen Bäume in Kombination mit Landwirtschaft auf derselben Fläche angebaut werden“. Andere Autoren haben Agroforstwirtschaft als die Praxis definiert, Gehölzvegetation (Bäume oder Sträucher) bewusst mit Pflanzen- und/oder Tiersystemen zu integrieren, um von den daraus resultierenden ökologischen und ökonomischen Wechselwirkungen zu profitieren (den Herder et al., 2017) sowie landwirtschaftliche Produkte aus dem Unterholz (Mosquera-Losada et al., 2016) bereitzustellen. Weltweit gibt es mehrere Kategorien gängiger Agroforstpraktiken (Mosquera-Losada et al., 2009). Dazu gehören beispielsweise silvoarable¹⁵, silvopastorale¹⁶ und agrosilvorable¹⁷ Systeme sowie Alley Cropping¹⁸. Allen diesen Praktiken ist gemeinsam, dass die interaktiven Vorteile der Kombination von Bäumen und Sträuchern mit Feldfrüchten und/oder Nutztieren den jeweiligen Betrieben die Möglichkeit bieten, ein integriertes Landnutzungssystem zu schaffen (Lundgren & Raintree, 1982). Darüber hinaus ist die Verbesserung der Ökosystemleistungen, die durch Agroforstsysteme erbracht

¹⁵ Gehölz und Ackerbau

¹⁶ Gehölz und Weide- bzw. Grünland

¹⁷ Mischform aus Weideland, Ackerbau und Gehölz

¹⁸ Integration von Strauch- und Baumstreifen

wird, öffentlich weithin anerkannt. Agroforstsysteme werden oft mit hohen positiven Wirkungen in Bezug auf den Naturschutz in Verbindung gebracht und stellen eine Vielzahl von Ökosystemleistungen bereit (Jose, 2009). Gemäss einer von Agroscope durchgeführten Studie (Kay et al., 2019) zeigen erste wissenschaftliche Ergebnisse sowie versetzte Zuwachsmo­delle die Vorteile von Agroforstsystemen in den Bereichen Biodiversität sowie Erosionsschutz. Eine Hektare mit 50 Bäumen kann jährlich je nach Wachstumsbedingungen des Standorts ungefähr 1,2 t Kohlenstoff speichern. Weiter wurden Bewirtschaftende befragt, wie die Umweltleistungen ihrer Agroforstsysteme wahrgenommen werden. Die Regulations- und Habitatfunktionen wurden als sehr positiv eingeschätzt. Zusätzlich wurden folgende Leistungen erwähnt: Freude am Baum und dessen Bewirtschaftung, Vorteil einer diversifizierten Produktionsfläche, eine optimale Kombination von Ökologie und Ökonomie, Motivation für sensibilisierte Kundinnen und Kunden bei regionaler Vermarktung sowie der Fakt, dass bleibende Werte auf dem Acker geschaffen werden, wo normalerweise nur einjährige Pflanzen stehen.

2.12.1 Umweltziele Schweizer Landwirtschaft

Im Rahmen einer von Agroscope¹⁹ durchgeführten Agroforststudie (Kay et al., 2019) wurde auf Grundlage des 2016 veröffentlichten Statusberichts über die Erreichung der Umweltziele der Schweizer Landwirtschaft (BAFU & BLW, 2016) die Eignung von Agroforstsystemen untersucht, um den Erfüllungsgrad nicht erreichter Teilziele zu verbessern. Nachfolgend werden von den Teilzielen, bei denen Agroforst als geeignete Methode eingestuft wurde, diejenigen Ziele aufgeführt, bei welchen Keyline-Design hypothetisch eine unterstützende Funktion haben könnte:

Umweltziel Biodiversität und Landschaft

Lösungsansatz für das Teilziel ‹ausreichender Gewässerraum›: Durch die Aufwertung des Gewässerraums und die Förderung der Dürresistenz werden entlang Fließgewässern Uferwiesen, Hecken, Feld- sowie Ufergehölze nachhaltig gefördert (McIvor et al., 2014).

Keyline-Hypothese: Mittels Keyline-Design als Wassermanagementstrategie werden Gewässerräume resilienter gegenüber Dürreperioden.

Umweltziel Klima und Luft

Lösungsansatz für die Teilziele ‹Treibhausgasemissionen› und ‹stickstoffhaltige Luftschadstoffe›: Erhöhung des Kohlenstoffanteils im Boden (Seitz et al., 2017).

Keyline-Hypothese: Durch die Erhöhung der Regenerationsrate des Oberbodens wird schneller und in grösseren Mengen Kohlenstoff im Boden gebunden.

¹⁹ Kompetenzzentrum für landwirtschaftliche Forschung des eidgenössischen Bundesamts für Landwirtschaft (BLW).

Umweltziel Wasser:

Lösungsansatz für die Teilziele *⟨Nitrat- und Phosphorbelastung⟩*, *⟨Pflanzenschutzmittel⟩* und *⟨Tierarzneimittel⟩*: Reduktion der Nitratauswaschung (Smith et al., 2013), des Phosphoraustrags (Schoumans et al., 2014) sowie der Konzentration an Pflanzenschutz- und Tierarzneimitteln in Oberflächengewässern (Ho et al., 2020).

Keyline-Hypothese: Durch das mittels Keyline-Kultivierungsmuster angestrebte Maximieren der Infiltrationsfläche von Oberflächenabfluss landen konsequent weniger unerwünschte Schadstoffe in Gewässern.

Umweltziel Boden:

Lösungsansatz für die Teilziele *⟨Bodenerosion⟩* und *⟨Bodenverdichtung⟩*: Gegenmassnahmen Bodenverdichtung (Batey, 2009), Reduktion des Bodenabtrags (McIvor et al., 2014), Erhöhung der Bodenfruchtbarkeit (Seitz et al., 2017) sowie Verbesserung der Bodenstabilität (B. W. Murphy, 2015).

Keyline-Hypothese: Durch den Einsatz von Tiefenmeisseln im Keyline-Muster wird Bodenverdichtung aktiv angegangen, Bodenerosion verringert und die Qualität des Bodens nachhaltig verbessert.

Umweltziel Klimawandel

Lösungsansatz für die Teilziele *⟨Hitzestress⟩*, *⟨Trockenheit⟩* und *⟨Starkniederschläge⟩*: Durch Erhöhung der Wasserhaltekapazität des Bodens können negative Effekte von Dürreperioden sowie starken Niederschlägen verringert werden (Sánchez & McCollin, 2015).

Keyline-Hypothese: Durch die erfolgreiche Umsetzung von Keyline-Methoden werden Landschaften resilienter gegenüber den negativen Auswirkungen des globalen Klimawandels.

2.13 Diskussion der Ergebnisse der Literaturrecherche

Um die Eignung von Keyline-Design als Gegenmassnahme zur Gewässerverschmutzung und den negativen Auswirkungen des globalen Klimawandels in der Landwirtschaft zu prüfen, wurde eine Literaturrecherche durchgeführt. Es wurden lediglich drei wissenschaftliche Arbeiten gefunden, welche fundierte Aussagen über die Effektivität von Keyline-Systemen machen. Aufgrund der geringen Anzahl an vorhandenen Studien und in Anbetracht der Heterogenität der untersuchten Thematik kann dem Untersuchungsergebnis somit keine grosse Aussagekraft zugewiesen werden.

Die Ergebnisse der wenigen vorhandenen Studien zeichneten jedoch ein positives Bild. Die Modellierung und Umsetzung von Keyline-Methoden auf Versuchsflächen führten im direkten Vergleich mit den Kontrollflächen unter bestimmten Voraussetzungen zu einer leichten Bodenverbesserung in Bezug auf Wasserkapazität, Wasserinfiltrationsrate, Erhöhung des organischen Kohlenstoffs sowie Durchwurzelungstiefe (del Carmen Ponce-Rodríguez et al., 2021) und zu einer

Verringerung der Erosionsrate (Giambastiani et al., 2023) sowie des Durchdringungswiderstands des Bodens (Duncan & Krawczyk, 2018).

Eine Erklärung für die geringe Anzahl wissenschaftlicher Aussagen zur Effektivität von Keyline-Design bietet möglicherweise das mangelhafte Verständnis der nicht mehr zeitgemässen, in den Texten des Keyline-Gründers P. A. Yeomans (1958a) beschriebenen Methoden und deren stark eingeschränkte Anwendbarkeit auf Ortsgebiete, welche nicht die gleichen geomorphologischen Eigenschaften aufweisen, wie sie in der Heimat des Autors in Australien auftreten. Dies kann aufgrund von Aussagen durch die heute praktizierenden Keyline-Fachkundigen Georgi Pavlov (2015) und Richard Perkins (2019) bestätigt werden. Die von ihnen entwickelten gegenwartsnahen Methoden zur Erstellung von Keyline-Mustern wurden im Rahmen dieser Bachelorarbeit dokumentiert und dienen als Basis für weitere Forschungsarbeiten im Bereich Wassermanagement mit Keyline-Design.

Das Definieren einer einheitlichen Vorgehensweise zur Erstellung von Keyline-Mustern wurde zusätzlich dadurch erschwert, dass situationsbedingt, je nach dem Projektgebiet und der Kultivierungspraxis, in welche Keyline-Design integriert werden soll, sehr unterschiedliche Ausgangslagen bestehen. Es muss berücksichtigt werden, dass die Charakterisierung eines Keyline-Projekts vor allem eine klare Abgrenzung der verwendeten Methoden für das Wassermanagement impliziert. Dies kann entweder eine nach dem Keyline-Muster ausgerichtete Tiefenlockerung sein, die Anlegung von ebenfalls nach dem Keyline-Muster ausgerichteten Swales und Staudämmen oder eine Kombination dieser beiden Methoden.

Eine Empfehlung für weitere Forschung ist daher, unabhängig vom Konzept Keyline eine Literaturrecherche über die Effektivität der beiden Methoden Tiefenlockerung und Swales als Wassermanagementstrategien durchzuführen und die Ausgangsbedingungen klar zu definieren, unter denen diese Methoden einen legitimen Lösungsansatz darstellen. Anschliessend kann mittels der gewonnenen Erkenntnisse ein standortgerechter Versuch konzipiert werden, bei welchem die entsprechende Methode, ausgerichtet an ein konventionelles Muster, einem Keyline-Muster und einer Kontrollfläche gegenübergestellt wird.

3 Fallstudie Erstellung Keyline-Muster

Auf Basis der im vorherigen Kapitel durchgeführten Literaturrecherche und der persönlichen Kommunikation mit Keyline-Fachkräften wird nachfolgend für ausgewählte LN die schrittweise Erstellung von Keyline-Mustern mittels der GIS-Anwendung ArcGIS Pro²⁰ dokumentiert und anschliessend als Karte präsentiert. Die Endergebnisse werden auf ihre Kongruenz mit den Keyline-Geometrieprinzipien untersucht und die Vorgehensweise der Erstellung der Muster wird anhand der resultierenden Ergebnisse kritisch hinterfragt.

3.1 Untersuchungsgebiet

Bei der Wahl der LN, auf welche das Keyline-Design-Muster eingezeichnet werden soll, wurde Wert darauf gelegt, sowohl den Entstehungsprozess eines simplen als auch den eines etwas komplexeren Musters aufzuzeigen. Anhand von Informationen persönlicher Kontakte fiel die Wahl auf die LN des Landwirtschaftsbetriebs Grüezi Garten²¹, welcher sich im Dorf Allenwinden in der Gemeinde Baar des Kantons Zug befindet. Der Betrieb beschreibt die eigene landwirtschaftliche Praxis als «biologisch-regenerative Garten-Landwirtschaft nach den Grundsätzen der Permakultur». Die Betriebsleiterin steht einer allfälligen Umsetzung von Keyline-Design-Projekten grundsätzlich offen gegenüber (D. Greenway-Brunschweiler, persönliche Kommunikation, 03.01.2023).



Abbildung 44: Draufsicht Grüezi Garten (Quelle: Grüezi Garten GmbH)

²⁰ ArcGIS Pro Version 3.0.3, Softwareproduzent: ESRI Inc.

²¹ WGS84 Koordinaten in Dezimalgrade: 8.5541288°E, 47.1614840°N.

3.2 Datengrundlage

Zur Erstellung der Keyline-Muster wurden die in der nachfolgenden Tabelle 1 aufgeführten, öffentlich verfügbaren Daten verwendet:

Tabelle 1: Datengrundlage Keyline-Muster Grüezi Garten

Datenbezeichnung	Datentyp	Verwendungszweck	Herausgeber / Link Quelle
Digitales Höhenmodell swissALTI3D	Rasterdaten (COG)	Höhenlinien, hydrologische Modellierung	<i>Bundesamt für Landestopografie swisstopo²²</i>
Digitales Oberflächenmodell swissSURFACE3D	LiDAR-Daten (LAS)	Höhenlinien, hydrologische Modellierung	<i>Bundesamt für Landestopografie swisstopo²³</i>
Teileinzugsgebiete Schweizer Gewässer 2 km ²	Vektordaten (GPKG)	Analyse Einzugsgebiet	<i>BAFU²⁴</i>
Grundbuchplan, Amtliche Vermessung ZG	Vektordaten (GPKG)	Grundstückkataster	<i>Amt für Grundbuch und Geoinformation des Kantons Zug²⁵</i>
Satellitenbild, World Imagery Basemap	Orthofoto	Markierung Felder, visuelle Referenzpunkte	Anwendungsintern ArcGIS Pro

²² <https://www.swisstopo.admin.ch/de/geodata/height/alti3d.html>

²³ <https://www.swisstopo.admin.ch/de/geodata/height/surface3d.html>

²⁴ https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wasser/zustand/karten/geodaten/einzugsgebiets_gliederung_schweiz.html

²⁵ <https://www.geocat.ch/geonetwork/srv/ger/catalog.search#/metadata/c8d6b648-5e65-4873-8fe6-0529643c69d7>

3.3 Vorgehensweise

Nachfolgend wird die Vorgehensweise zur Erstellung des Keyline-Musters für den Betrieb Grüezi Garten beschrieben.

3.3.1 Einzugsgebietsanalyse

Die Parzelle, auf welcher sich der Betrieb befindet, wurde als Polygon aus dem Datensatz ‹Amtliche Vermessung ZG› extrahiert und die zugehörigen Teileinzugsgebiete wurden dem Datensatz ‹Teileinzugsgebiete Schweizer Gewässer 2 km²› entnommen.

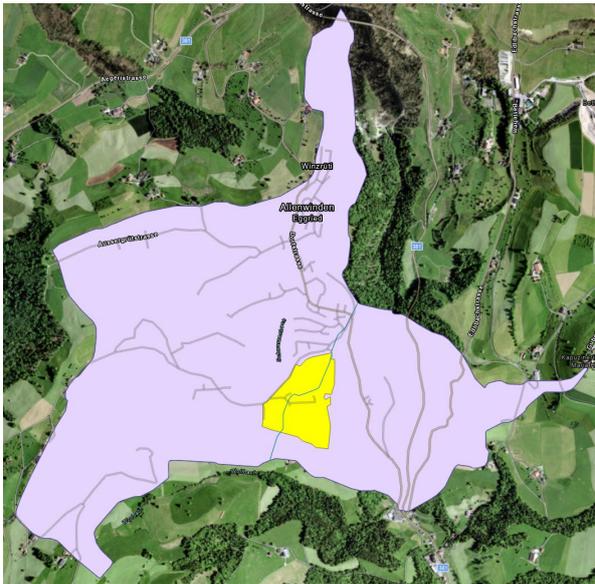


Abbildung 45: Markierung Parzelle Projektgebiet (gelb), zugehörige Einzugsgebiete (lila) und Einzugsgebietstrennlinie (blau)

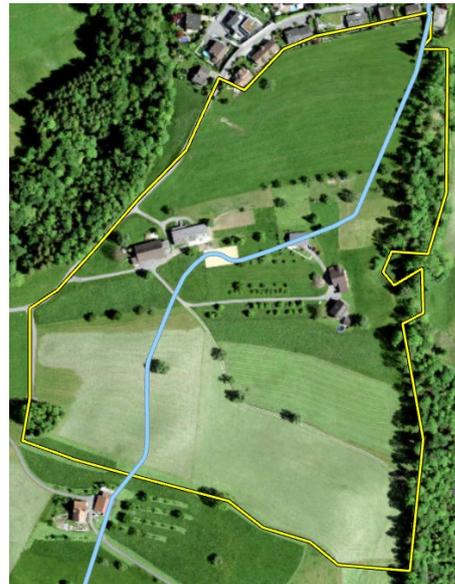


Abbildung 46: Grenzmarkierung Parzelle Projektgebiet (gelb) und Einzugsgebietstrennlinie (blau)

Wie sich in Abbildung 46 erkennen lässt, wird die Parzelle durch zwei Teileinzugsgebiete getrennt. Diese Trennlinie wird als Polylinie markiert (Abbildung 47) und dient dem Verständnis des Verhaltens des Oberflächenabflusses.

3.3.2 Aufbereitung Höhendaten:

Die Datensätze ‹SwissALTI3D› und ‹swissSURFACE3D› wurden auf das Einzugsgebiet sowie auf die Parzelle zugeschnitten. Der LiDAR-Datensatz ‹swissSURFACE3D› wurde im Vorfeld mit dem Werkzeug ‹Conversion›²⁶ in ein Rasterdatensatz umgewandelt.

²⁶ LAS-Dataset in Raster erstellt ein Raster mithilfe von Höhenwerten, die in den LiDAR-Punkten gespeichert sind, auf die das LAS-Dataset verweist.

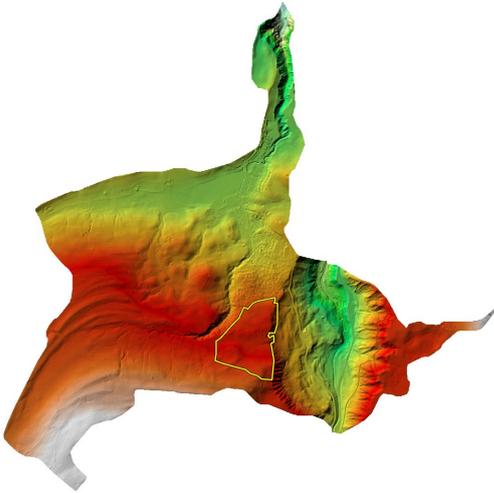


Abbildung 47: DHM gesamtes Einzugsgebiet

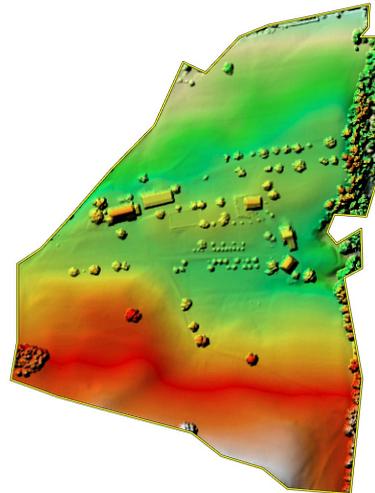


Abbildung 48: DOM Parzelle

3.3.3 Feldmarkierung

Es wurden drei verschiedene Felder markiert, welche für die Applikation von Keyline infrage kommen (Feld 1, Feld 2 und Feld 3). Aus dem DHM²⁷ und DOM²⁸ der Parzelle wurden mittels Ausschneidefunktion jeweils drei auf die Feldgrenzen angepasste Rasterdatensätze erstellt.

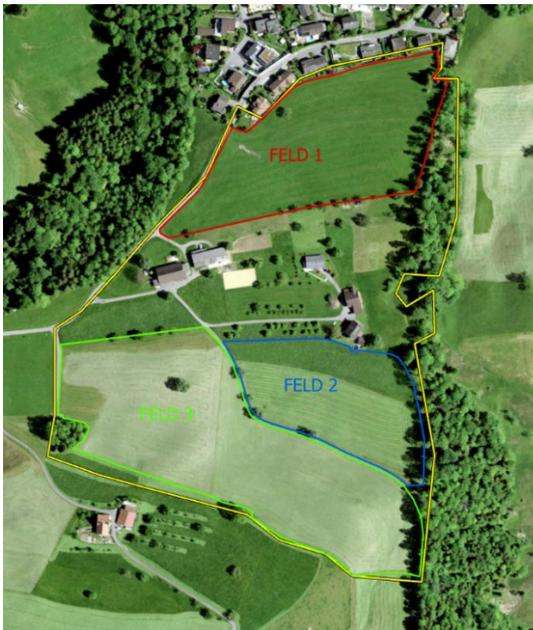


Abbildung 49: Markierung Felder 1, 2 und 3

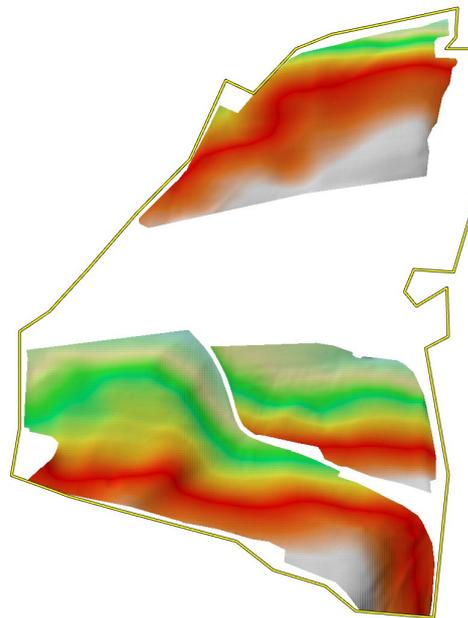


Abbildung 50: DHM ausgeschnitten auf Feldmarkierungen

²⁷ Digitales Höhenmodell

²⁸ Digitales Oberflächenmodell

3.3.4 Hangneigung berechnen

Um Flächenbereiche auszuschliessen, welche aufgrund ihrer Steilheit für die maschinelle Bewirtschaftung ungeeignet sind, wurde mittels der Funktion $\langle \text{Slope} \rangle^{29}$ das Gefälle der Parzelle berechnet (Abb. 52) und in drei verschiedene Kategorien unterteilt: gering (beige): unter 20° Gefälle, mittel (orange): $20\text{--}26.5^\circ$ Gefälle und hoch (rot): über 26.5° Gefälle. Aufgrund der höheren Genauigkeitsanforderung wurde hierfür der DOM-Datensatz $\langle \text{swissSURFACE3D} \rangle$ verwendet. Zu steile Zonen wurden ausgeschlossen (Abb. 53).



Abbildung 51: Markierung der Problemstellen mit Gefälle über dem Schwellenwert von 20°



Abbildung 52: Feldmarkierung nach Ausschluss der ausgewählten Problemstellen

Problemzonen 1 und 3: Diese Bereiche weisen ein mittleres Gefälle auf und können aufgrund ihrer Kleinräumigkeit ignoriert werden.

Problemzonen 2, 5 und 8: Diese Bereiche weisen ein mittleres bis hohes Gefälle auf und befinden sich am äussersten Rand der Felder. Aufgrund der geringfügigen Auswirkung auf die Gesamtfläche werden diese Bereiche ausgeschlossen.

Problemzonen 4, 6 und 7: Alle diese Bereiche befinden sich in Feld 3 und weisen ein mittleres bis hohes Gefälle auf. Sie sind grossflächig verteilt und eine sichere maschinelle Bewirtschaftung der Fläche kann aufgrund des Gefälles nicht gewährleistet werden, weshalb die Feldfläche 3 reduziert werden muss.

²⁹ Darstellung der Änderungsrate der Höhe für jede DHM-Zelle.

3.3.5 Erstellung Höhenlinien

Im nächsten Schritt wurden mit dem Werkzeug «Contour»³⁰ die Höhenlinien für die gesamte Parzelle erstellt. Die Steilheit ist innerhalb des Projektgebiets dermassen unterschiedlich, dass sich keine einheitlichen Höhenlinienintervalle wählen lassen (Abb. 54). Auf Basis der in Kapitel 2.10.2 beschriebenen Angaben und der im vorherigen Schritt 3.3.4 erhaltenen Daten wurden für die Felder 1 und 2 Abstände von 0.5 m gewählt und für Feld 3 ein Abstand von 1 m (Abb. 55).



Abbildung 53: Höhenlinien auf Parzelle mit einheitlichen Abständen (0.5 m)



Abbildung 54: Höhenlinien mit unterschiedlichen Abständen (Feld 1 und 2: 0.5 m; Feld 3: 1 m)

3.3.6 Vorgewende

Um den Kraftfahrzeugen am Ende der Reihen genügend Platz zum Wenden bieten zu können, wurde mittels der Funktion «Copy Parallel»³¹ ein Vorgewende von 4 m Breite eingezeichnet (Abb. 56). Die gewünschte Breite ist abhängig von den Maschinen, welche zum Einsatz kommen sollen und kann sehr unterschiedlich ausfallen.

³⁰ Erstellt aus einer Rasteroberfläche eine Line-Feature-Class von Konturlinien.

³¹ Erstellt eine parallele Kopie einer Linie in festgelegter Entfernung.

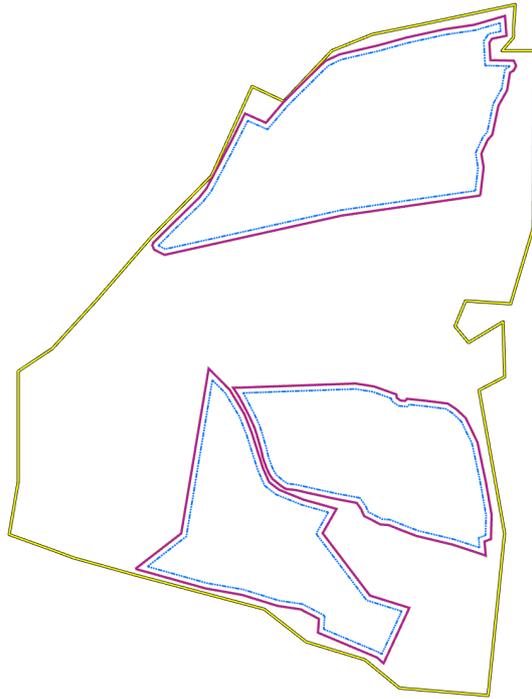


Abbildung 55: Feldgrenzen (lila) mit Vorgewende (blau) von 4 m Breite

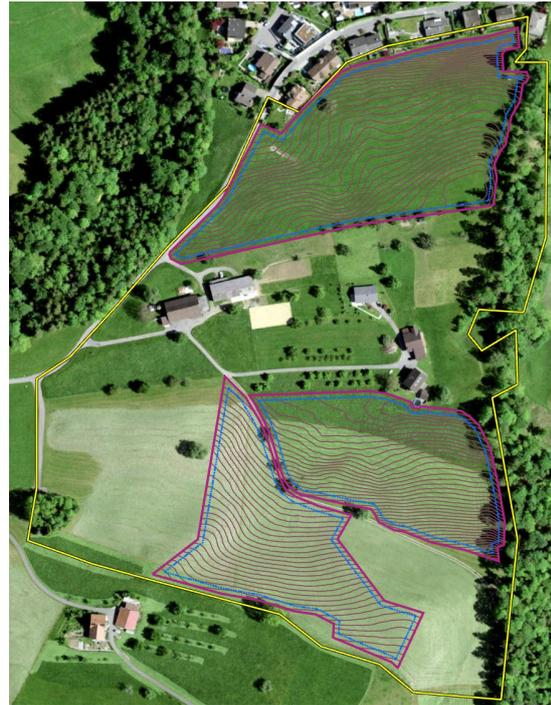


Abbildung 56: Feldgrenzen (lila) mit Vorgewende (blau) und Höhenlinien (braun)

3.3.7 Hydrologische Analyse

Als letzter Schritt vor dem eigentlichen Einzeichnen des Musters wurde der Oberflächenabfluss mittels hydrologischer Modellierung visualisiert, um ein genaues Verständnis über das Wasserlaufnetz auf der Parzelle zu erhalten. Dazu wurde zuerst für das DHM mit dem Werkzeug ‹Flow Direction›³² die Fliessrichtung ermittelt und der resultierende Rasterdatensatz mit dem Werkzeug ‹Sink›³³ auf Senken überprüft, welche das Endergebnis verfälschen könnten. Danach wurden gefundene Störfelder mit dem Werkzeug ‹Fill›³⁴ korrigiert. Abschliessend wurde auf das resultierende hydrologische Modellierungshöhenmodell das Werkzeug ‹Flow Accumulation›³⁵ verwendet, um das Wasserlaufnetz zu visualisieren (Abb. 58). Zur Ermittlung der Wassertrennliesen durch Erhebungen wurden exakt dieselben Schritte mit vorheriger Umkehrung der Werte des ursprünglichen DHM-Rasterdatensatzes durchgeführt (Abb. 59).

³² Ermittelt, welche Zellen flussaufwärts von anderen Zellen liegen.

³³ Erstellt ein Raster, das alle Senken oder Flächen mit interner Drainage identifiziert.

³⁴ Füllt Senken in einem Oberflächenraster, um alle Unregelmässigkeiten in den Daten zu entfernen.

³⁵ Erstellt für jede Zelle ein Raster der Abflussakkumulation.

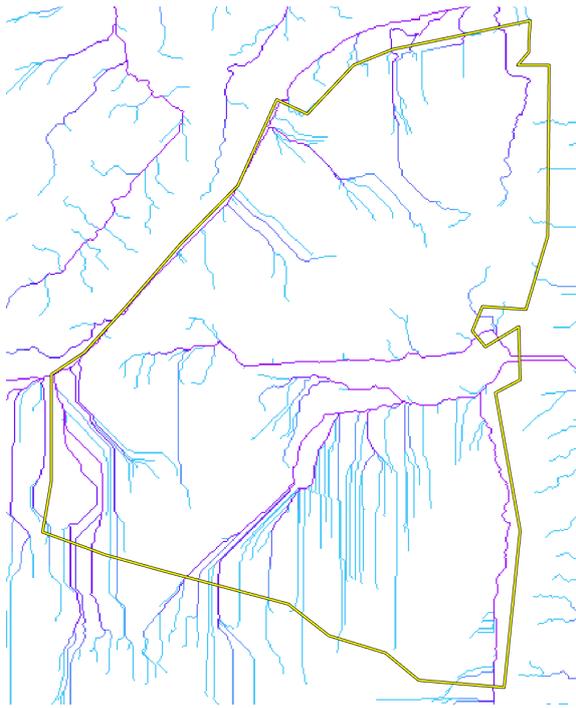


Abbildung 57: Hydrologische Modellierung Wasserlaufnetz

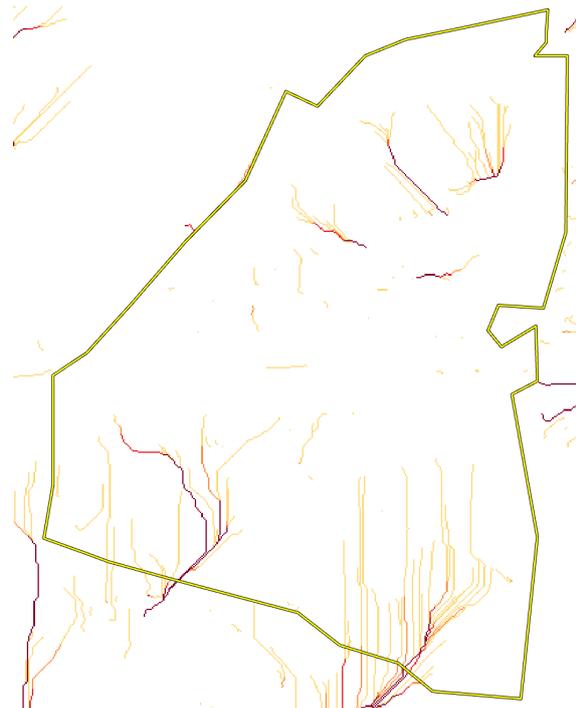


Abbildung 58: Hydrologische Modellierung Wassertrennlinien durch Erhebung

Die resultierenden Rasterdaten der Abflusslinien (Abb. 58) und Wassertrennlinien (Abb. 59) wurden anschliessend kategorisiert, übereinandergelegt (Abb. 60) und durch das manuelle Einzeichnen neuer Polylinien vereinfacht dargestellt.

Nachfolgend wird zu jedem Feld eine kurze Übersicht der aus der hydrologischen Modellierung gewonnenen Erkenntnisse wiedergegeben, welche bei der Erstellung des Keyline-Musters behilflich waren.

Feld 1: Die Abfluss- und Trennlinien ziehen sich gleichmässig abwechselnd durch den Grossteil der Fläche und die Erstellung eines einheitlichen Keyline-Kultivierungsmusters sollte kein Problem darstellen. Die In Kapitel 3.3.4 ermittelte Problemzone 1 kann bei allfälligen Problemen in der Umsetzung des Kultivierungsmusters bedenkenlos von der Fläche ausgeschlossen werden, da kein signifikanter Oberflächenabfluss darauf stattfindet.

Feld 2: Im linken Bereich fliesst der bereits im Feld 3 (T31) stark gebündelte Niederschlag ab (T21). Im nördlichen Bereich des Felds trifft dann der Oberflächenabfluss von Feld 3 und Feld 2 zusammen und fliesst im nordöstlichen Bereich ab. Im gesamten Feld wurde lediglich eine Kammlinie ermittelt (K21) und die Herausforderung besteht nun darin, den Oberflächenabfluss von T21, T22 und T23 aus in dessen Richtung zu lenken. Ein einheitliches Muster sollte möglich sein, da das Feld recht klein ist und die Geländetopografie keine markanten Veränderungen aufweist.

Feld 3: Der Oberflächenabfluss wird an der Stelle T31 stark gebündelt und der Fokus sollte auf die Zerstreung dieser Bündelung gelegt werden, weil das Wasser weiter in Feld 2 abfließt und dort zu Vernässung führen kann. Ein einheitliches Muster sollte dank der starken Verkleinerung, welche im Rahmen der Neigungsanalyse durchgeführt wurde, keine grossen Probleme darstellen.

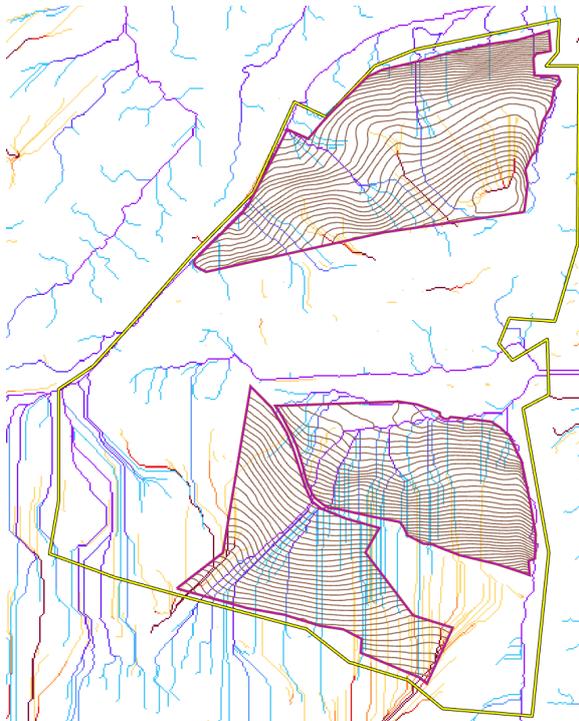


Abbildung 59: Rasterdaten aus hydrologischer Modellierung übereinandergelegt

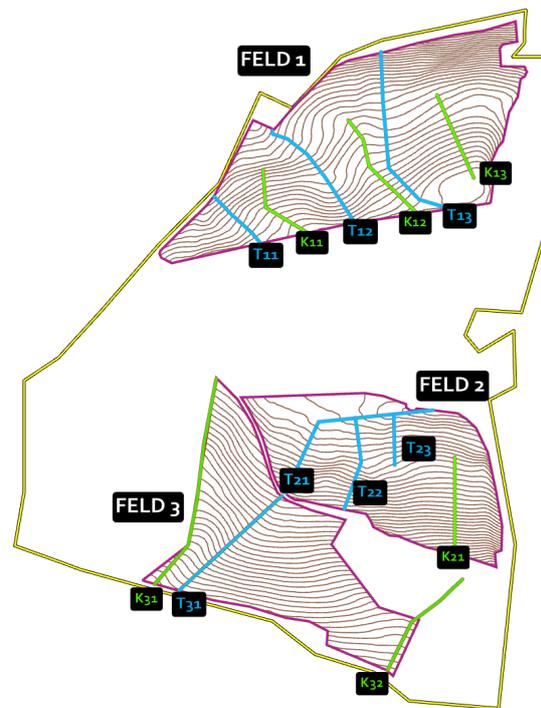


Abbildung 60: Vereinfachte und beschriftete Daten aus Abbildung 64

3.3.8 Zeichnen der Keyline-Muster

Im ersten Schritt wurden möglichst in der Mitte des jeweiligen Feldes platzierte Höhenlinien als Ausgangspunkte für die Leitlinien des Keyline-Musters ausgewählt (Abb. 62). Danach wurden die im vorherigen Schritt erstellten vereinfachten Linien aus der hydrologischen Modellierung als Orientierungshilfe zur Erstellung der Leitlinien verwendet (siehe Kapitel 2.6). Mittels <Copy parallel>-Werkzeug wurden in einem Abstand von 5 m nach links und rechts Parallellinien erstellt (Abb. 63).

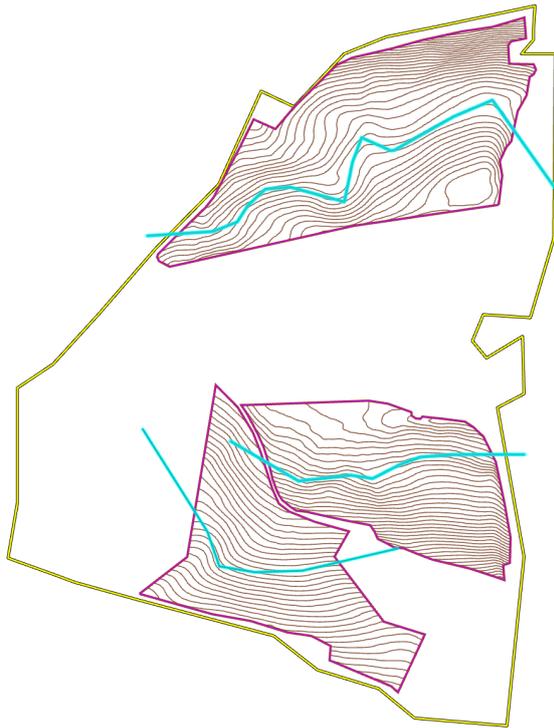


Abbildung 61: Leitlinien als Ausgangspunkte für das Keyline-Muster

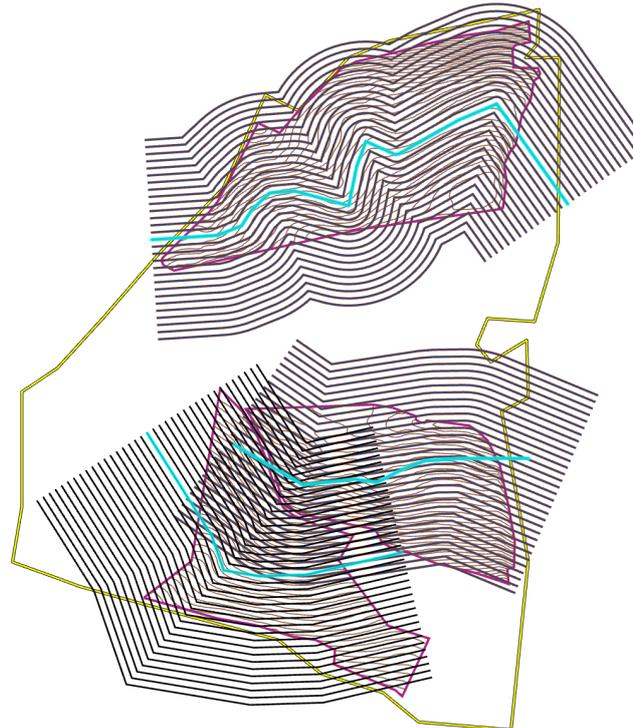


Abbildung 62: Mittels 'Copy Parallel' erstellte Parallellinien der Leitlinien

3.3.7 Ausschneiden

Nach Durchführung aller beschriebenen Arbeitsschritte und anschliessendem Ausschneiden der kopierten Parallellinien ergaben sich die nachfolgend abgebildeten Keyline-Muster (Abb. 64 und 65):

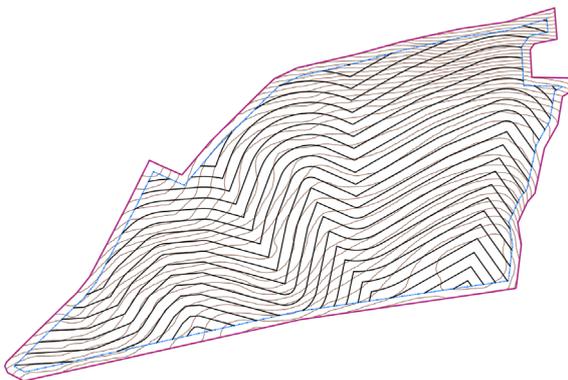


Abbildung 63: Keyline-Muster Feld 1

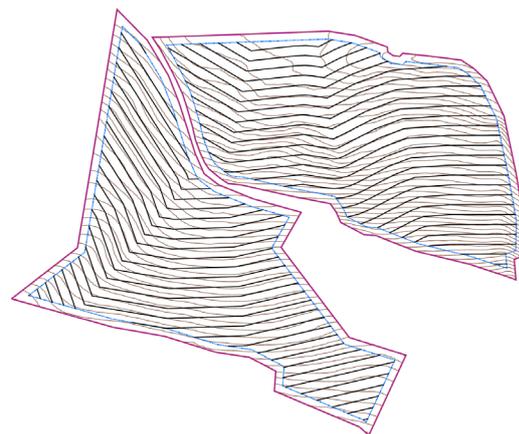


Abbildung 64: Keyline-Muster Feld 2 (oben rechts) und 3 (unten)

Im nachfolgenden Kapitel werden die Muster eingebettet in einer Karte als Endresultat abgebildet und anschliessend analysiert.

3.4 Ergebnis Keyline-Muster

Im Folgenden ist die im Rahmen dieser Fallstudie erstellte Karte mit den Keyline-Mustern für Grüezi Garten abgebildet (Abb. 66).



Abbildung 65: Fertige Karte mit Keyline-Muster für den Betrieb Grüezi Garten

3.5 Diskussion der Ergebnisse der Fallstudie

Im Folgenden werden die erstellten Keyline-Muster betrachtet und mit den Ergebnissen der hydrologischen Modellierung verglichen, um zu prüfen, ob eine Kongruenz mit den erstellten Mustern und den Keyline-Geometrieprinzipien gegeben ist. Weiterhin werden die Aussagen der Betriebsleiterin von Grüezi Garten mit den gewonnenen Erkenntnissen aus der hydrologischen Modellierung verglichen und die Eignung von Keyline-Massnahmen an verschiedenen Stellen infrage gestellt.

Feld 1 (Acker): Das Muster führt, wie gewünscht, fast in der gesamten Fläche von den Abflusslinien hangabwärts zu den Hanglinien. Es sind nur wenige Ausnahmen erkennbar, welche aufgrund ihrer Kleinräumigkeit ignoriert werden können. Der einzige Punkt, welcher ein Problem in der Bewirtschaftung darstellen könnte, ist der nordöstliche Teil des Felds (P1), auf welchem die im Vergleich zum restlichen Gelände stärkere Hangneigung dazu führt, dass das Muster schlagartig steiler wird. Der Bereich wird aktuell als Hecke verwendet und die Empfehlung wäre, dies entweder so zu belassen oder, je nach gewünschtem Verwendungszweck, ein zweites, weniger steiles Keyline-Muster für diesen Bereich zu erstellen. Im südöstlichen Bereich (P3) findet eine starke Bündelung von Oberflächenabfluss ausserhalb des Felds statt. Es wird daher empfohlen, diesen Bereich ebenfalls in das Muster miteinzubeziehen, um das abfliessende Wasser bereits an einer höheren Stelle abfangen und umleiten zu können. Im nordwestlichen Bereich (P2) sind die Wasserakkumulationswerte hoch, was darauf hinweist, dass sich an dieser Stelle viel Wasser sammelt. Gemäss der Betriebsleiterin wurde vor einiger Zeit genau an dieser Stelle eine Drainageleitung installiert, deren Funktionsfähigkeit aufgrund erneut auftretender Staunässe infrage steht (D. Greenway-Brunschweiler, persönliche Kommunikation, 03.01.2023).

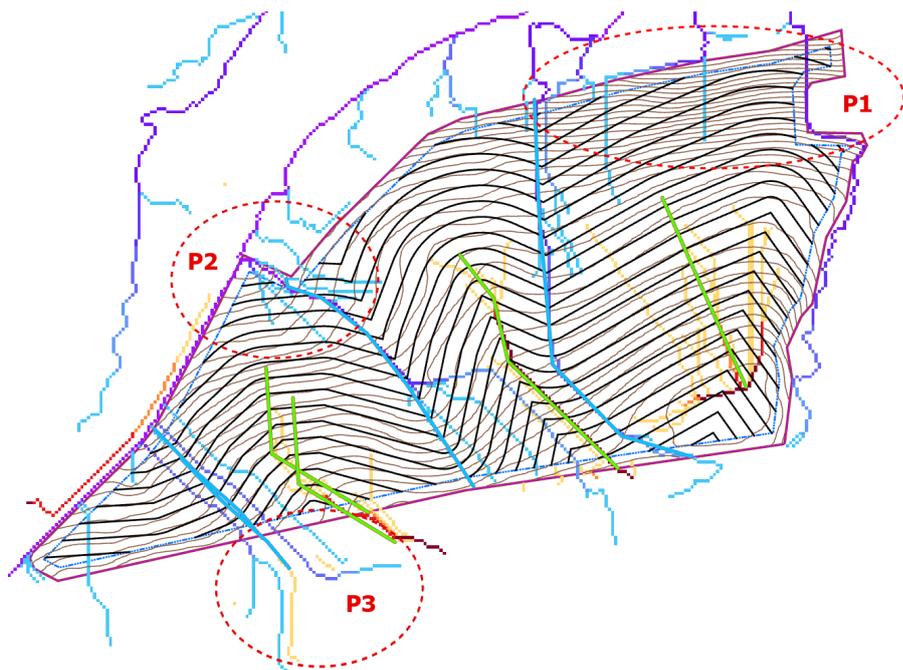


Abbildung 66: Ergebnisanalyse Keyline-Muster Feld 1

Feld 2 (Heuwiese): Aufgrund der in P5 lokalisierten Artefakte, welche aus dem verwendeten DHM stammen, kann dem hydrologischen Modell in diesem Abschnitt keine hohe Aussagekraft zugewiesen werden. Stattdessen wurden bei der Erstellung des Musters die geländemorphologischen Eigenschaften in diesem Bereich vollständig anhand der Höhenlinien abgeleitet. Hauptcharakteristik des Felds 2 ist die hohe Menge an Oberflächenabfluss, welche von Feld 3 aus im Punkt P4 in das Feld eintritt. Das Muster ist korrekterweise so ausgelegt, dass diese Bündelung seitlich abgeleitet werden kann und die restlichen Ansammlungen von Wasser ebenfalls auf den rechten Bereich des Felds abfallend abfließen können. Im Bereich P6 findet eine starke Ansammlung von Wasser statt, welche aufgrund der Ebenheit des Felds in diesem Bereich in der Kultivierung zu Problemen führen könnte. Gemäss den Angaben der Betriebsleiterin findet in diesem Bereich aufgrund von Staunässe tatsächlich aktuell keine Kultivierung statt. In diesem Bereich könnten im Falle einer erfolgreichen Umsetzung eines Keyline-Design-Wassermanagementsystems zusätzliche LN entstehen. Künftig sind hier Biotopflächen mit integrierten Teichen geplant.

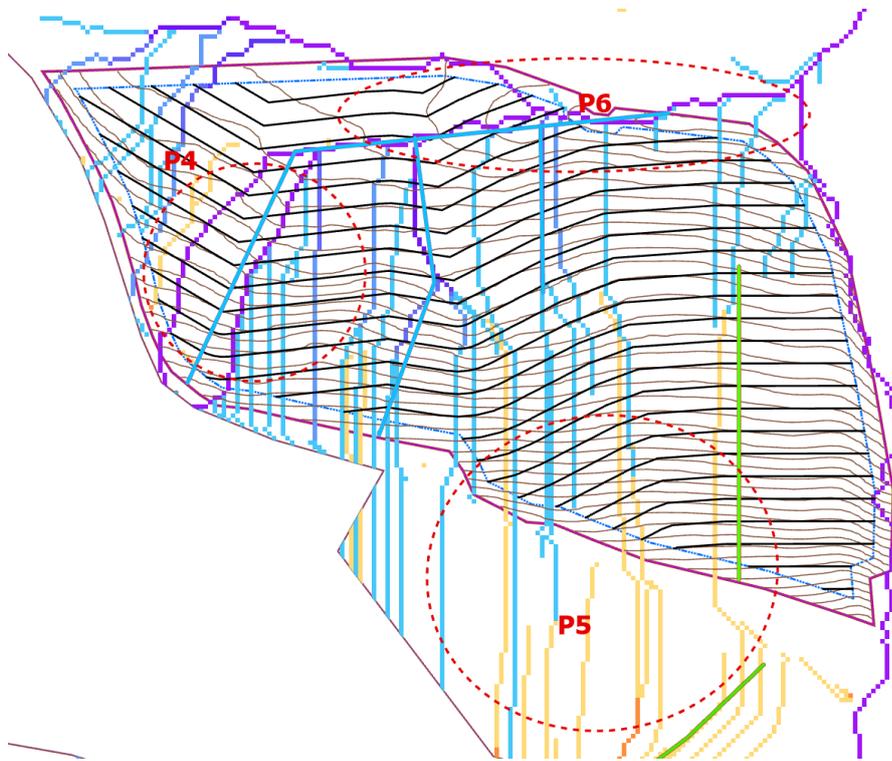


Abbildung 67: Ergebnisanalyse Keyline-Muster Feld 2

Feld 3 (Weide): Wie auch in Feld 2 sind in diesem Feld Artefakte aus dem DHM vorzufinden, jedoch beschränken sich diese grösstenteils auf den östlichen Bereich, welcher bereits im Vorfeld ausgeschlossen wurde. Hauptcharakteristik dieses Felds ist die sehr hohe Bündelung von Wasser in der Mitte des Felds, welches korrekterweise vom Muster in die beiden Seiten umgeleitet wird. Das Muster ist in dieser Form optimal ausgerichtet und weist keine Problemstellen auf. Eine Umleitung von Oberflächenabfluss würde zu einer Verringerung der Vernässung auf Feld 2 führen.

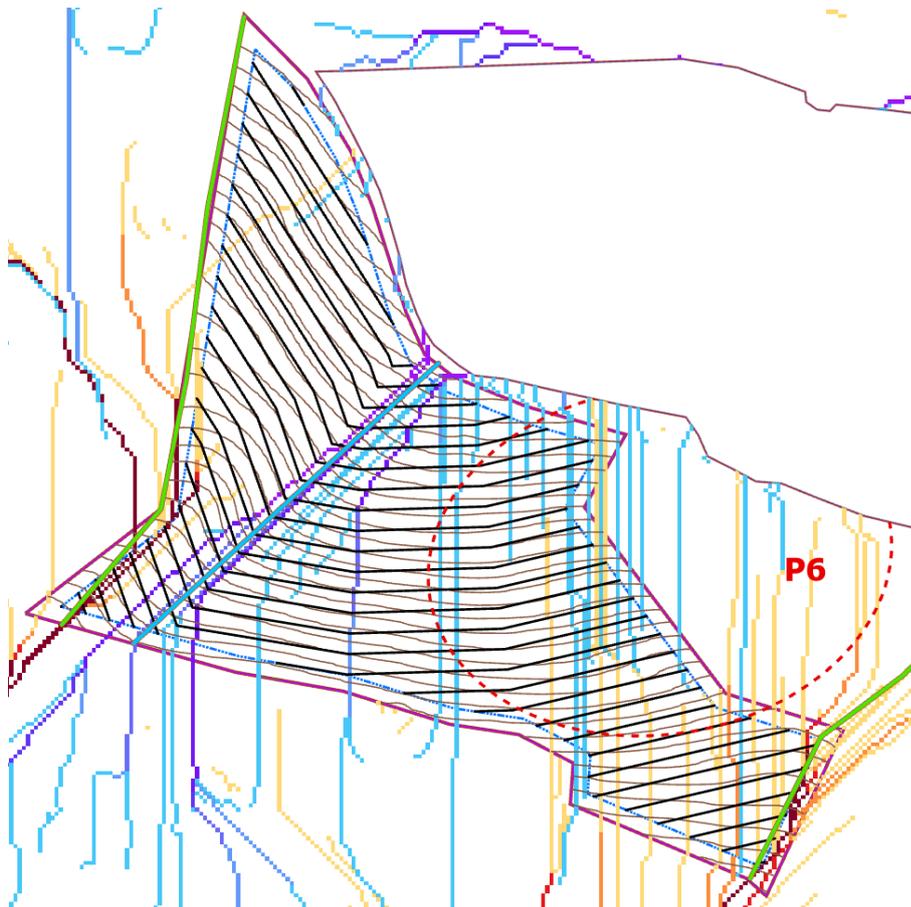


Abbildung 68: Ergebnisanalyse Keyline-Muster Feld 3

Abschliessend lässt sich festhalten, dass auf allen drei Flächen grosses Potenzial in Bezug auf Wassermanagement durch Keyline-Methoden besteht. Vor der Umsetzung eines Keyline-Projekts müsste jedoch zwingend der genaue Zustand des bestehenden Drainagesystems ermittelt werden. Gemäss Aussagen der Betriebsleiterin von Grüezi Garten sind Drainagerohre unter den meisten Feldern verlegt worden, jedoch fehlt genaues Wissen darüber, an welchen Stellen dies durchgeführt wurde und ob diese noch funktionieren (D. Greenway-Brunschweiler, persönliche Kommunikation, 03.01.2023). Die Daten der im Rahmen dieser Arbeit erstellten hydrologischen Modellierung können dabei nützlich sein, potenzielle Standorte der Drainagerohre zu ermitteln.

4 Diskussion

Um das Potenzial von Keyline-Design zur Bekämpfung der zunehmend negativen Auswirkungen des globalen Klimawandels auf die Landwirtschaft (Kappelle et al., 2022) zu prüfen, wurde im Rahmen dieser Arbeit das Konzept Keyline anhand einer Literaturrecherche und auf Basis von Stellungnahmen fachkundiger Personen untersucht. Anschliessend wurden die ermittelten Erfahrungswerte zur Erstellung von Keyline-Mustern für einen Schweizer Landwirtschaftsbetrieb verwendet.

Die Ergebnisse der Forschung haben gezeigt, dass Keyline-Design durchaus über Potenzial als Wassermanagementstrategie in der landwirtschaftlichen Praxis verfügt (siehe *Kapitel 2.13*). Auch in der Schweizer Landwirtschaft sollte das Konzept Keyline als Mittel gegen die immer häufiger und länger auftretenden Dürreperioden (Calanca et al., 2022) und die veralteten Drainagesysteme (Prasuhn et al., 2018) untersucht werden. Zur Prüfung des Potenzials von Keyline-Systemen zur Erreichung der Umweltziele Schweizer Landwirtschaft (BAFU & BLW, 2016) wurde im Rahmen dieser Arbeit eine von Agroscope durchgeführte Agroforststudie (Kay et al., 2019) untersucht. Die Analyseergebnisse zeigten, dass eine Vielzahl an Teilzielen (siehe *Kapitel 2.12.1*), zu deren Verbesserung Agroforst beitragen kann (siehe Anhang A), durch eine zusätzliche Integration von Keyline-Design potenziell noch besser erfüllt werden könnten.

Zu Beginn wurde davon ausgegangen, dass zur Erstellung von Keyline-Mustern ein umfangreiches Verständnis über die in der Originalliteratur (P. A. Yeomans, 1954) beschriebenen Methoden vorhanden sein müsste. Nach ausgiebiger Recherche bereits existierender Keyline-Projekte und deren dokumentierter Vorgehensweise zur Erstellung von Keyline-Mustern (Perkins, 2019) und nach persönlicher Kommunikation mit dem Keyline-Experten Georgi Pavlov (Anhang B) kann diese Erwartung jedoch widerlegt werden.

Eine an die heutige Zeit angepasste und vereinfachte Vorgehensweise zur Erstellung von Keyline-Mustern wurde anhand der Rechercheergebnisse in *Kapitel 2.10.4* beschrieben und wie in *Kapitel 3.3* dargestellt durchgeführt. Auf Basis von Fachwissen aus dem Bereich der Geoinformatik wurde die Methode weiter ausgearbeitet und es wurde eine hydrologische Modellierung in den Prozess integriert (*Kapitel 3.3.7*). Bei der Erstellung der Keyline-Mustern und der Analyse von deren hypothetischer Wirksamkeit führte dies zu präziseren Ergebnissen im Vergleich zu einer manuellen Analyse der geomorphologischen Geländeeigenschaften anhand der Höhenlinien.

Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass die dokumentierte Vorgehensweise weiterhin stark auf manuell-iterativen Methoden basiert und weitere Forschungsarbeit notwendig ist, um eine Vorgehensweise zu entwickeln, die maximale Effizienz in der Auffindung passender Muster-Leitlinien garantieren kann. Eine Empfehlung für weitere Forschung ist daher, das Potenzial einer auf Algorithmen basierenden Vorgehensweise zur Erstellung von Keyline-Mustern zu prüfen. Ein möglicher

Ansatz zur Umsetzung wäre die automatisierte Verwendung eines Werkzeugs zur Erstellung von Leitlinien entlang eines bestimmten Gefälles und eine anschliessende Anpassung der erstellten Objekte mittels Algorithmus zur Linienvereinfachung – zum Beispiel mittels Douglas-Peucker-Algorithmus (Douglas & Peucker, 2011) oder Visvalingam-Whyatt-Algorithmus (Visvalingam & Whyatt, 1990).

Mithilfe der vorliegenden Arbeit konnte gezeigt werden, dass weitere Forschungsarbeit über die Effektivität von Keyline-Systemen notwendig ist, bevor wissenschaftlich fundierte Aussagen über das Verbesserungspotenzial von Bodeneigenschaften gemacht werden können. Im Zuge weiterer Forschungsarbeiten muss in dieser Hinsicht eine klare Unterscheidung gemacht werden zwischen Keyline-Systemen, die das Keyline-Pflügen anwenden, und solchen, die Swales als primäre Wassermanagementstrategie verwenden.

Des Weiteren wurde die gegenwärtige Vorgehensweise zur Erstellung von Keyline-Mustern beschrieben und die Kenntnis daraus gezogen, dass die heutige Praxis sich stark von der in der Originalliteratur beschriebenen Methode differenziert. In zukünftigen Forschungen könnte eine tiefergehende Auseinandersetzung mit der Legitimität der Verwendung des Begriffs «Keyline» stattfinden und gegebenenfalls eine neue Definition für Systeme formuliert werden, die zwar an Keyline angelehnte Wassermanagementstrategien darstellen, jedoch die in *Kapitel 2.5* beschriebenen Keyline-Elemente im Entstehungsprozess nicht berücksichtigen.

5 Fazit

In der vorliegenden Studie wurde den Fragen nachgegangen, was Keyline-Design als Wassermanagementstrategie charakterisiert und ob es über Potenzial zur Verbesserung von Bodeneigenschaften und Umweltfaktoren in der Landwirtschaft verfügt.

Die Ergebnisse haben gezeigt, dass im Rahmen von Keyline-Design primär zwischen dem Umleiten von Oberflächenabfluss durch das oberflächige Anlegen von Swales und dem Einsatz des Keyline-Pflügens unterschieden werden sollte. Durch die zu diesem Thema existierenden wissenschaftlichen Studien konnte die Erkenntnis gewonnen werden, dass Keyline-Systeme durchaus über das Potenzial verfügen, die Wasserkapazität und Durchdringungsrate von Böden zu verbessern sowie die Nähr- und Schadstoffbelastung lokaler Gewässer zu verringern. Es ist jedoch zu beachten, dass die Aussagekraft der Effektivität von Keyline-Systemen durch die geringe Anzahl an durchgeführten Studien limitiert ist und weiterer Forschungsbedarf besteht.

Ein weiterer Aspekt von Keyline, der im Rahmen dieser Arbeit untersucht wurde, ist die Erstellung von Keyline-Mustern, an denen die primären Keyline-Techniken ausgerichtet werden – das Keyline-Pflügen und das Anlegen von Swales. Aus den Ergebnissen lässt sich schliessen, dass die heutige Praxis sich stark von der aus den 1950er-Jahren stammenden Originalliteratur «The Keyline Plan» beschriebenen Vorgehensweise abwendet und dank moderner Werkzeuge und Erkenntnisse eine simplere Methode zur Erstellung von Keyline-Mustern verwendet werden kann. In dieser Hinsicht stellt sich jedoch die Frage, ob noch von Keyline-Systemen gesprochen werden sollte, da im Rahmen der gegenwärtigen Methode, die dieser Wassermanagementstrategie namensgebenden Elemente «Keylines» und «Keypoints» grösstenteils nicht berücksichtigt werden.

Die vereinfachte Methode zur Erstellung von Keyline-Mustern wurde zu Modellierungszwecken auf einer landwirtschaftlichen Nutzfläche angewandt und dokumentiert. Durch die Integration einer hydrologischen Modellierung konnte die Präzision der Erstellung von Keyline-Mustern zwar gesteigert werden, jedoch besteht weiterhin grosses Verbesserungspotenzial zur Ausarbeitung der Methode mithilfe von Algorithmen zur Erreichung der maximalen Effizienz des Keyline-Musters.

Abschliessend kann gesagt werden, dass Keyline-Design potenziell eine geeignete Wassermanagementstrategie darstellt, um die landwirtschaftliche Produktion resilienter gegenüber den negativen Auswirkungen des globalen Klimawandels zu gestalten, jedoch bislang wenig akademische Aufmerksamkeit bekommen hat. Diese Bachelorarbeit dient somit als Grundlage für weiterführende Forschung in diesem Bereich.

6 Literaturverzeichnis

- Ahluwalia, O., Singh, P. C., & Bhatia, R. (2021). A review on drought stress in plants: Implications, mitigation and the role of plant growth promoting rhizobacteria. *Resources, Environment and Sustainability*, 5, 100032. <https://doi.org/10.1016/j.resenv.2021.100032>
- Andreadis, K. M., & Lettenmaier, D. P. (2006). Trends in 20th century drought over the continental United States. *Geophysical Research Letters*, 33(10). <https://doi.org/10.1029/2006GL025711>
- B. W. Murphy. (2015). Impact of soil organic matter on soil properties—A review with emphasis on Australian soils. *Soil Research*, 53(6), 605–635. <https://doi.org/10.1071/SR14246>
- BAFU, & BLW. (2016). *Umweltziele Landwirtschaft—Statusbericht 2016*. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/thema-biodiversitaet/biodiversitaet--publikationen/publikationen-biodiversitaet/umweltziele-landwirtschaft-statusbericht.html>
- Batey, T. (2009). Soil compaction and soil management – a review. *Soil Use and Management*, 25(4), 335–345. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2009.00236.x>
- Bathiany, S., Ney, P., Belleflamme, A., El Zohbi, J., Goergen, K., & Rechid, D. (2021). *6.8 Entwicklung von Dürren in Deutschland, Europa und weltweit*.
- Braun, C., Gälli, R., Leu, C., Munz, N., Schindler Wildhaber, Y., Strahm, I., & Wittmer, I. (2015). Mikroverunreinigungen in Fließgewässern aus diffusen Einträgen. Situationsanalyse. Bundesamt für Umwelt, Bern. *Umwelt-Zustand Nr. 1514: 78 S.*
- Bravar, L., & Kavvas, M. L. (1991). On the physics of droughts. I. A conceptual framework. *Journal of Hydrology*, 129(1), 281–297. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(91\)90055-M](https://doi.org/10.1016/0022-1694(91)90055-M)
- Calanca, P., Wüst-Galley, C., Giuliani, S., & Erdin, D. (2022). *Auswirkungen der Trockenheit auf die Produktivität des Schweizer Grünlands*.
- Clark, P. U., Alley, R. B., & Pollard, D. (1999). Northern Hemisphere Ice-Sheet Influences on Global Climate Change. *Science*, 286(5442), 1104–1111. <https://doi.org/10.1126/science.286.5442.1104>
- del Carmen Ponce-Rodríguez, M., Carrete-Carreón, F. O., Núñez-Fernández, G. A., de Jesús Muñoz-Ramos, J., & Pérez-López, M.-E. (2021). Keyline in Bean Crop (*Phaseolus vulgaris* L.) for Soil and Water Conservation. *Sustainability*, 13(17), Art. 17. <https://doi.org/10.3390/su13179982>
- den Herder, M., Moreno, G., Mosquera-Losada, R. M., Palma, J. H. N., Sidiropoulou, A., Santiago Freijanes, J. J., Crous-Duran, J., Paulo, J. A., Tomé, M., Pantera, A., Papanastasis, V. P., Mantzanas, K., Pachana, P., Papadopoulos, A., Plieninger, T., & Burgess, P. J. (2017). Current extent and

stratification of agroforestry in the European Union. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 241, 121–132. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.03.005>

Doherty, D. J., & Jeeves, A. E. (2015). *The Reagrarians Handbook*.

Douglas, D. H., & Peucker, T. K. (2011). Algorithms for the Reduction of the Number of Points Required to Represent a Digitized Line or its Caricature. In *Classics in Cartography* (S. 15–28). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9780470669488.ch2>

Douville, H., Renwick, J., Raghaven, K., Allan, R., Arias, P., Barlow, M., Cerezo-Mota, R., Cherchi, A., Gan, T. Y., Gergis, J., Jiang, D., Kahn, A., Pokem, W., Rosenfeld, D., & Tierney, J. (2021). *IPCC AR6 WGI Chapter08: Water Cycle Changes*.

Duncan, S., & Krawczyk, T. (2018). *Keyline Water Management: Field Research & Education in the Capital Region*. Columbia Británica, Canadá. Recuperado de <https://www.bcagclimateaction.ca>

Entropy rates for Horton self-similar trees. (2018, April 19). DeepAI. <https://deepai.org/publication/entropy-rates-for-horton-self-similar-trees>

European Commission. (2013). *Regulation 1305/2013 of the European Parliament and of the Council of 17 December 2013 on support for rural development by the European Agricultural Fund for Rural Development (EAFRD) and repealing Council Regulation 1698/2005*. European Commission. <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2013:347:0487:0548:EN:PDF>.

Fahad, S., Bajwa, A. A., Nazir, U., Anjum, S. A., Farooq, A., Zohaib, A., Sadia, S., Nasim, W., Adkins, S., Saud, S., Ihsan, M. Z., Alharby, H., Wu, C., Wang, D., & Huang, J. (2017). Crop Production under Drought and Heat Stress: Plant Responses and Management Options. *Frontiers in Plant Science*, 8, 1147. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01147>

Farooq, M., Wahid, A., & Basra, N. K. D. F. S. M. A. (2009). Plant drought stress: Effects, mechanisms and management. *Agronomy for Sustainable Development*, 29(1), 185–212. <https://doi.org/10.1051/agro:2008021>

Giambastiani, Y., Biancofiore, G., Mancini, M., Di Giorgio, A., Giusti, R., Cecchi, S., Gardin, L., & Errico, A. (2023). Modelling the Effect of Keyline Practice on Soil Erosion Control. *Land*, 12(1), Art. 1. <https://doi.org/10.3390/land12010100>

Hayes, M., Svoboda, M. D., Wardlow, B. D., Anderson, M., & Kogan, F. (2012). Drought Monitoring: Historical and Current Perspectives. *Drought Mitigation Center Faculty Publications*. <https://digitalcommons.unl.edu/droughtfacpub/94>

- Ho, Y.-C., Lim, B.-C., & Lim, J.-W. (2020). *Agricultural Runoff and Treatment Methods* [Chapter]. Handbook of Research on Resource Management for Pollution and Waste Treatment; IGI Global. <https://doi.org/10.4018/978-1-7998-0369-0.ch023>
- Hornbeck, R., & Keskin, P. (2014). The Historically Evolving Impact of the Ogallala Aquifer: Agricultural Adaptation to Groundwater and Drought. *American Economic Journal: Applied Economics*, 6(1), 190–219. <https://doi.org/10.1257/app.6.1.190>
- Horton, R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins: Hydrophysical approach to quantitative morphology. *GSA Bulletin*, 56(3), 275–370. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1945\)56\[275:EDOSAT\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1945)56[275:EDOSAT]2.0.CO;2)
- Jose, S. (2009). Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits: An overview. *Agroforestry Systems*, 76(1), 1–10. <https://doi.org/10.1007/s10457-009-9229-7>
- Kahiluoto, H., Kaseva, J., Balek, J., Olesen, J. E., Ruiz-Ramos, M., Gobin, A., Kersebaum, K. C., Takáč, J., Ruget, F., Ferrise, R., Bezak, P., Capellades, G., Dibari, C., Mäkinen, H., Nendel, C., Ventrella, D., Rodríguez, A., Bindi, M., & Trnka, M. (2019). Decline in climate resilience of European wheat. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 116(1), 123–128. <https://doi.org/10.1073/pnas.1804387115>
- Kappelle, M., Kennedy, J., Wang, Y., Baddour, O., & Silva, Á. (2022). *State of the Global Climate 2021*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.23099.90400>
- Karavitis, C., Tsesmelis, D., Skondras, N., Stamatakos, D., Alexandris, S., Fassouli, V., Vasilakou, C., Oikonomou, P., Gregorič, G., Grigg, N., & Vlachos, E. (2014). Linking drought characteristics to impacts on a spatial and temporal scale. *Water Policy*, 16, 1172–1197. <https://doi.org/10.2166/wp.2014.205>
- Karl, T. R., & Riebsame, W. E. (1989). The impact of decadal fluctuations in mean precipitation and temperature on runoff: A sensitivity study over the United States. *Climatic Change*, 15(3), 423–447. <https://doi.org/10.1007/BF00240466>
- Kay, S., Jäger, M., & Herzog, F. (2019). Ressourcenschutz durch Agroforstsysteme – standortangepasste Lösungen. *Agrarforschung Schweiz*, 8.
- Kothgasser, M. (2018). *Frostabwehr im Obst- und Weinbau: Die Vielfalt der Methoden und ihre Wirksamkeit unter besonderer Berücksichtigung der Bewindung / vorgelegt von Michael Kothgasser* [Karl-Franzens-Universität Graz]. <http://unipub.uni-graz.at/obvugrhs/2679445>
- Lundgren, B., & Raintree, T. B. (1982). *Agroforestry*. <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/5229136>

Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M. I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J. B. R., Maycock, T. K., Waterfield, T., Yelekçi, Ö., Yu, R., & Zhou, B. (Hrsg.). (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>

McIvor, I., Youjun, H., Daoping, L., Eyles, G., & Pu, Z. (2014). Agroforestry: Conservation Trees and Erosion Prevention. In *Encyclopedia of Agriculture and Food Systems* (S. 208–221). <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-52512-3.00247-3>

Mosquera-Losada, M. R., McAdam, J. H., Romero-Franco, R., Santiago-Freijanes, J. J., & Rigueiro-Rodríguez, A. (2009). Definitions and Components of Agroforestry Practices in Europe. In A. Rigueiro-Rodríguez, J. McAdam, & M. R. Mosquera-Losada (Hrsg.), *Agroforestry in Europe: Current Status and Future Prospects* (S. 3–19). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8272-6_1

Mosquera-Losada, M. R., Santiago-Freijanes, J., Pisanelli, A., Rois, M., Smith, J., Herder, M., Moreno, G., Malignier, N., Mirazo, J. R., Lamersdorf, N., Ferreiro-Domínguez, N., Balaguer, F., Pantera, A., Rigueiro-Rodríguez, A., Gonzalez, P., Lorenzo, J. L., Romero, R., Chalmin, A., García de Jalón, S., & Burgess, P. (2016). *Extent and Success of Current Policy Measures to Promote Agroforestry across Europe*.

Nuccio, M. L., Paul, M., Bate, N. J., Cohn, J., & Cutler, S. R. (2018). Where are the drought tolerant crops? An assessment of more than two decades of plant biotechnology effort in crop improvement. *Plant Science*, 273, 110–119. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2018.01.020>

Pavlov, G. (2015). *Understanding the Application of Keyline Geometry*. http://permatronc.ressources-permaculture.fr/Ajoute-des-fichiers-ici/EBOOK_Understanding_the_Application_of_Keyline_Geometry_%5BENGLISH%5D.pdf

Perkins, R. (2019). *Regenerative Agriculture—A Practical Whole Systems Guide to Making Small Farms Work*.

Prasuhn, V., Gramlich, A., Stoll, S., Aldrich, A., Stamm, C., & Walter, T. (2018). Einflüsse landwirtschaftlicher Drainage auf den Wasserhaushalt, auf Nährstoffflüsse und Schadstoffaustrag. *Eine Literaturstudie*. Zürich: Agroscope (Agroscope science Umwelt Nr. 73 (November 2018)). Online verfügbar unter <https://www.agroscope.admin.ch/agroscope/de/home/publikationen/suchen>.

Prasuhn, V., & Koch, U. (2021). Risikokarten für den Eintrag von Pflanzenschutzmitteln in Oberflächengewässer auf Einzugsgebietsebene. *Agroscope Science*, 126.

Prasuhn, V., Kupferschmid, P., Spiess, E., & Hürdler, J. (2016). *Szenario-Berechnungen für das Projekt zur Verminderung diffuser Nährstoffeinträge in die Gewässer der Schweiz mit MODIFFUS*.

Projekt Fennematt—Interview mit Eide Dücker. (2020). diagnose-funk.org. <https://www.diagnose-funk.org/aktuelles/artikel-archiv/detail?newsid=1560>

Saha, A., Rattan, B., Sekharan, S., & Manna, U. (2020). Quantifying the interactive effect of water absorbing polymer (WAP)-soil texture on plant available water content and irrigation frequency. *Geoderma*, 368, 114310. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114310>

Sánchez, I. A., & McCollin, D. (2015). A comparison of microclimate and environmental modification produced by hedgerows and dehesa in the Mediterranean region: A study in the Guadarrama region, Spain. *Landscape and Urban Planning*, 143, 230–237. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.07.002>

Saxena, R., Tomar, R. S., & Kumar, M. (2016). Exploring Nanobiotechnology to Mitigate Abiotic Stress in Crop Plants. *Journal of Pharmaceutical Sciences and Research*, 8, 974–980.

Schoumans, O. F., Chardon, W. J., Bechmann, M. E., Gascuel-Oudou, C., Hofman, G., Kronvang, B., Rubæk, G. H., Ulén, B., & Dorioz, J.-M. (2014). Mitigation options to reduce phosphorus losses from the agricultural sector and improve surface water quality: A review. *Science of The Total Environment*, 468–469, 1255–1266. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.08.061>

Seitz, B., Carrard, E., Burgos, S., Tatti, D., Herzog, F., Jäger, M., & Sereke, F. (2017). *Erhöhte Humusvorräte in einem siebenjährigen Agroforstsystem in der Zentralschweiz* [Application/pdf]. <https://doi.org/10.24451/ARBOR.6871>

Simtowe, F., Amondo, E., Marenya, P., Rahut, D., Sonder, K., & Erenstein, O. (2019). Impacts of drought-tolerant maize varieties on productivity, risk, and resource use: Evidence from Uganda. *Land Use Policy*, 88, 104091. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.104091>

Smith, C. M., David, M. B., Mitchell, C. A., Masters, M. D., Anderson-Teixeira, K. J., Bernacchi, C. J., & DeLucia, E. H. (2013). Reduced Nitrogen Losses after Conversion of Row Crop Agriculture to Perennial Biofuel Crops. *Journal of Environmental Quality*, 42(1), 219–228. <https://doi.org/10.2134/jeq2012.0210>

Solh, M., & van Ginkel, M. (2014). Drought preparedness and drought mitigation in the developing world's drylands. *Weather and Climate Extremes*, 3, 62–66. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2014.03.003>

Spaeth, H. (1978). Zur funktion der bodenfeuchte im erosions- und landwirtschaftlichen produktionsprozess der zentralen great plains (u.s.a.). zur funktion der bodenfeuchte im erosions- und landwirtschaftlichen produktionsprozess der zentralen great plains (U.S.A.).

Strahler, A. N. (1952). Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. *GSA Bulletin*, 63(11), 1117–1142. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1952\)63\[1117:HAAOET\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1952)63[1117:HAAOET]2.0.CO;2)

United in Science: We are heading in the wrong direction. (2022, September 12). <https://public.wmo.int/en/media/press-release/united-science-we-are-heading-wrong-direction>

Uwizeyimana, D., Mureithi, S. M., Karuku, G., & Kironchi, G. (2018). Effect of water conservation measures on soil moisture and maize yield under drought prone agro-ecological zones in Rwanda. *International Soil and Water Conservation Research*, 6(3), 214–221. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2018.03.002>

Van Loon, A. F., Gleeson, T., Clark, J., Van Dijk, A. I. J. M., Stahl, K., Hannaford, J., Di Baldassarre, G., Teuling, A. J., Tallaksen, L. M., Uijlenhoet, R., Hannah, D. M., Sheffield, J., Svoboda, M., Verbeiren, B., Wagener, T., Rangelcroft, S., Wanders, N., & Van Lanen, H. A. J. (2016). Drought in the Anthropocene. *Nature Geoscience*, 9(2), Art. 2. <https://doi.org/10.1038/ngeo2646>

Visvalingam, M., & Whyatt, J. D. (1990). The Douglas-Peucker Algorithm for Line Simplification: Re-evaluation through Visualization. *Computer Graphics Forum*, 9(3), 213–225. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8659.1990.tb00398.x>

Vogt, J., Spinoni, J., & Naumann, G. (2018). *Dürre in Europa* (S. 119–125). <https://doi.org/10.2312/warnsignal.klima.extremereignisse.17>

Wilhite, D., & Glantz, M. (1985). Understanding: The Drought Phenomenon: The Role of Definitions. *Water International - WATER INT*, 10, 111–120. <https://doi.org/10.1080/02508068508686328>

Yang, D., Yang, Y., & Xia, J. (2021). Hydrological cycle and water resources in a changing world: A review. *Geography and Sustainability*, 2(2), 115–122. <https://doi.org/10.1016/j.geosus.2021.05.003>

Yeomans, P. A. (1954). *The Keyline Plan*. P. A. Yeomans.

Yeomans, P. A. (1958a). The development of Keyline. *1958*, 307.

Yeomans, P. A. (1958b). *The challenge of landscape: The development and practice of keyline* (First Edition). Keyline Pub. Pty.

Yeomans, P. A. (1971). *The City Forest: The Keyline Plan for the Human Environment Revolution*. Keyline Publishing.

Yeomans, P. A. (1973). *Water for Every Farm: Using the Keyline Plan* (Reprint Edition). Second Back Row Press.

Yeomans, P. A. (1976). *The Australian Keyline Plan for the Enrichment of Human Settlements*. P.A. Yeomans.

Yeomans, P. A. (2008). *Water For Every Farm: Yeomans Keyline Plan* (K. B. Yeomans, Hrsg.). CreateSpace Independent Publishing Platform.

Verzeichnis der Abbildungen

Abbildung 1: Natürliche Bündelung von Oberflächenabfluss (Quelle: Perkins, 2019).....	8
Abbildung 2: Gleichmässige Verteilung von Oberflächenabfluss mittels Keyline-Design (Quelle: Perkins, 2019).....	8
Abbildung 3: Yeomans‘ ‹Scale of Permanence›.....	9
Abbildung 4: Mittels Konturlinien, Keypoints und Keylines wird die Leitlinie (lila) ermittelt, welche als Ausgangspunkt zur Erstellung des Keyline-Musters dient (Quelle: Doherty & Jeeves, 2015).....	11
Abbildung 5: Anhand der Leitlinie (lila) werden Parallellinien hangaufwärts und -abwärts versetzt und ergeben das Keyline-Muster (grün) (Quelle: Doherty & Jeeves, 2015)	11
Abbildung 6: Geomorphologische Eigenschaften nach P. A. Yeomans (Pavlov, 2015).....	11
Abbildung 7: Primäre Landschaftseinheit abgebildet in dunkelgrau (Quelle: Doherty & Jeeves, 2015)	12
Abbildung 8: Querschnitt (oben) mit Keypoint und Wendepunkt der Hangneigungskurve. Übersicht (unten) des Keypoints und der Keyline mit der Fliessrichtung vom Oberflächenabfluss (Quelle: Doherty & Jeeves, 2015).....	12
Abbildung 9: Flussordnungszahlen nach Horton-Strahler (Quelle: Entropy rates for Horton self-similar trees, 2018).....	13
Abbildung 10: Originale Yeomans Plow aus Australien, produziert durch die Firma YEOMANS PLOW Co. Pty Ltd (Quelle: yeomansplow.com.au).....	15
Abbildung 11: Europäische Alternative der Yeomans Plow, produziert durch die Firma Evers AG (Quelle: eversagro.de).....	15
Abbildung 12: Empfohlenes Höhenlinienintervall abhängig vom Hangneigungsgrad (Quelle: Doherty, 2015).....	17
Abbildung 14: Erstellung Keylines – erster Schritt	18
Abbildung 15: Erstellung Keylines – zweiter Schritt	18
Abbildung 16: Erstellung Keylines – dritter Schritt	18
Abbildung 17: Erstellung Keylines – vierter Schritt.....	18
Abbildung 18: Graduelle Verschärfung des Kurvenradius.....	19
Abbildung 19: Korrektur zu scharfer Kurvenradien.....	19
Abbildung 20: Markierung Feldgrenze und Vorgewende (gestreift) (Quelle: Pavlov, 2015)	20

Abbildung 21: Feldgrenze (rot) und nutzbare Fläche (lila) Feld A (Quelle: Perkins, 2019)	20
Abbildung 22: Feldgrenze (rot) und nutzbare Fläche (lila) Feld B (Quelle: Perkins, 2019)	20
Abbildung 23: Geländeanomalie in Feld A (Quelle: Perkins, 2019)	21
Abbildung 24: Geländeanomalien in Feld B (Quelle: Perkins, 2019)	21
Abbildung 25: Beispiel einer vereinfachten Konturlinie unter Einhaltung der Keyline-Geometrieprinzipien (Quelle: Pavlov, 2015)	22
Abbildung 26: Reduktion von Datenpunkten einer Höhenkurve (rote Fahnen) zu einer vereinfachten Linie (blaue Fahnen) (Quelle: Pavlov, 2015).....	22
Abbildung 27: Leitlinie (lila) in Feld A (Quelle: Perkins, 2019).....	22
Abbildung 28: Leitlinie (hellblau) in Feld B (Quelle: Perkins, 2019)	22
Abbildung 29: Verlauf winkelhalbierende Linie (gestrichelt) (Quelle: Pavlov, 2015).....	23
Abbildung 30: Abstände zwischen Scheitelpunkten und Schenkeln zweier Winkel (Quelle: Pavlov, 2015).....	23
Abbildung 31: Berechnung der Winkelradien und Neigung der Schenkel (Quelle: Perkins, 2019).....	24
Abbildung 32: Überschneidung winkelhalbierender Parallellinien (Quelle: Perkins, 2019)	24
Abbildung 33: Vollendetes einheitliches Keyline-Muster (Quelle: Perkins, 2019).....	24
Abbildung 34: Verschärfung der Winkel im Keyline-Muster (Quelle: Perkins, 2019)	24
Abbildung 35: Markierung von Anomalien im Muster (Quelle: Pavlov, 2015).....	25
Abbildung 36: Markierung (orange) Unstimmigkeit Muster (Quelle: Perkins, 2019)	25
Abbildung 37: Korrektur der in Abbildung 40 gezeigten Unstimmigkeiten (Quelle: Perkins, 2019) ..	25
Abbildung 38: Keyline-Muster bestehend aus zwei verschiedenen Teilmustern (Quelle: Pavlov, 2015)	26
Abbildung 39: Keyline-Muster (Quelle: Pavlov, 2015).....	27
Abbildung 40: Keyline-Muster Feld B, bestehend aus zwei Teilmustern (Quelle: Perkins, 2019).....	27
Abbildung 41: Keyline-Muster mit eingeplanten Zwischenräumen zum Abfluss kalter Luft (Quelle: Pavlov, 2015).....	27
Abbildung 42: Draufsicht Keyline-Muster mit eingeplanten Zwischenräumen zum Abfluss kalter Luft (Quelle: Perkins, 2019).....	27
Abbildung 43: Keyline-Kultivierungsmuster auf der Ridgedale Farm (Quelle: Perkins, 2019).....	29

Abbildung 44: New Forest Farm in Wisconsin, USA (Quelle: newforestfarm.us)	30
Abbildung 45: Draufsicht Grüezi Garten (Quelle: Grüezi Garten GmbH).....	34
Abbildung 46: Markierung Parzelle Projektgebiet (gelb), zugehörige Einzugsgebiete (lila) und Einzugsgebietstrennlinie (blau)	36
Abbildung 47: Grenzmarkierung Parzelle Projektgebiet (gelb) und Einzugsgebietstrennlinie (blau)..	36
Abbildung 48: DHM gesamtes Einzugsgebiet.....	37
Abbildung 49: DOM Parzelle	37
Abbildung 50: Markierung Felder 1, 2 und 3	37
Abbildung 51: DHM ausgeschnitten auf Feldmarkierungen	37
Abbildung 52: Markierung der Problemstellen mit Gefälle über dem Schwellenwert von 20 °	38
Abbildung 53: Feldmarkierung nach Ausschluss der ausgewählten Problemstellen.....	38
Abbildung 54: Höhenlinien auf Parzelle mit einheitlichen Abständen (0.5 m).....	39
Abbildung 55: Höhenlinien mit unterschiedlichen Abständen (Feld 1 und 2: 0.5 m; Feld 3: 1 m).....	39
Abbildung 56: Feldgrenzen (lila) mit Vorgewende (blau) von 4 m Breite.....	40
Abbildung 57: Feldgrenzen (lila) mit Vorgewende (blau) und Höhenlinien (braun)	40
Abbildung 58: Hydrologische Modellierung Wasserlaufnetz.....	41
Abbildung 59: Hydrologische Modellierung Wassertrennlinien durch Erhebung.....	41
Abbildung 60: Rasterdaten aus hydrologischer Modellierung übereinandergelegt	42
Abbildung 61: Vereinfachte und beschriftete Daten aus Abbildung 64	42
Abbildung 62: Leitlinien als Ausgangspunkte für das Keyline-Muster.....	43
Abbildung 63: Mittels «Copy Parallel» erstellte Parallellinien der Leitlinien	43
Abbildung 64: Keyline-Muster Feld 1	43
Abbildung 65: Keyline-Muster Feld 2 (oben rechts) und 3 (unten).....	43
Abbildung 66: Fertige Karte mit Keyline-Muster für den Betrieb Grüezi Garten.....	44
Abbildung 67: Ergebnisanalyse Keyline-Muster Feld 1	45
Abbildung 68: Ergebnisanalyse Keyline-Muster Feld 2	46
Abbildung 69: Ergebnisanalyse Keyline-Muster Feld 3	47

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1: Datengrundlage Keyline-Muster Grüezi Garten	35
--	----

Anhang

Anhang A: Ressourcenschutz durch Agroforstsysteme

Überblick über die Teilziele der Umweltziele Landwirtschaft (UZL), die gemäss Statusbericht 2016 (BAFU und BLW 2016) nicht erreicht wurden, die Eignung von Agroforst, um die Zielerreichung zu verbessern, und das Vorhandensein räumlicher Information sowie Kriterien zur Abgrenzung der Defizitgebiete (Kay et al., 2019):

Umweltbereich	Teilbereich/Teilziel	Kategorie «Ziel wird voraussichtlich nicht erreicht»
UZL Biodiversität und Landschaft	Arten und Lebensräume	Regional deutliche Flächendefizite, insbesondere bei den Pufferzonen um Naturschutzgebiete Die Mehrzahl der Biodiversitätsförderflächen weist noch nicht die erforderliche ökologische Qualität auf oder wurde nicht am geeigneten Standort angelegt Defizite bestehen auch bei der Vernetzung und Durchlässigkeit
	Genetische Vielfalt	Für viele einheimische wildlebende Verwandte von Kulturpflanzen (CWR) und wildlebende Arten ist das Ziel nicht erreicht
	Ökosystemleistungen	Die Landwirtschaft hat nach wie vor zahlreiche negative Auswirkungen auf naturnahe Ökosysteme und deren Qualität, so dass deren Leistungen eingeschränkt sind
	Offenhaltung durch angepasste Bewirtschaftung	Es gehen weiterhin Landwirtschaftsflächen verloren
	Vielfalt der Kulturlandschaft	Zersiedelung, Zerschneidung und Versiegelung nehmen weiterhin zu
	Erhalt, Förderung und Weiterentwicklung regionsspezifischer Kulturlandschaften	Die Zielerreichung lässt sich noch nicht beurteilen
UZL Klima und Luft	Ausreichender Gewässerraum	Ausscheidung des Gewässerraums – Förderung von Uferwiesen entlang von Fliessgewässern sowie von Hecken, Feld- und Ufergehölzen
	Treibhausgasemissionen	Rund 0,6% Einsparung pro Jahr
	Stickstoffhaltige Luftschadstoffe	Max. 25 000t Stickstoff pro Jahr
	Dieseleruss	Max. 20t Dieseleruss pro Jahr
UZL Wasser	Nitratbelastung	Max. 25 mg Nitrat pro Liter in Gewässern zur Trinkwassernutzung –50% Stickstoffeintrag in die Gewässer im Vergleich zu 1985
	Phosphorbelastung	> 4 mg Sauerstoff pro Liter Seewasser Beeinträchtigungen bei Gewässern und Landlebensräumen vorhanden
	Pflanzenschutzmittel (PSM)	> 0,1 µg/l PSM in Oberflächengewässern Umweltrisiko durch PSM kann noch weiter gesenkt werden
	Tierarzneimittel	Im Boden, in kleinen Fliessgewässern und für die Biodiversität können in einzelnen Situationen Beeinträchtigungen vorkommen
UZL Boden	Schadstoffe im Boden	An einzelnen Standorten werden Kupfer und Zink akkumuliert Richtwertüberschreitungen für Erosion > 2 bzw. 4 t/ha
	Bodenerosion	Beeinträchtigung der Bodenfruchtbarkeit Beeinträchtigung der Gewässer durch abgeschwemmtes Material
	Bodenverdichtung	Fehlende Angaben
Klimawandel	Hitzestress	
	Trockenheit Starkniederschläge	

Verbesserung durch Agroforst möglich?	Kartenmaterial vorhanden?	Kriterien zur Abgrenzung der Defizitgebiete
Teilweise		
Nur für Hochstammfeldobstbau, Wytweiden, Hecken-Biodiversitätsförderflächen		
Erweiterung bzw. Aufwertung der Vernetzungskorridore (Leq et al. 2017)	Vernetzungskorridore (BAFU 2013)	Gesamtes Vernetzungsgebiet (Korridore 10m)
Nur bedingt		
U. a. Schaffung neuer Habitate für Bestäuber und Nützlinge / Nährstoff- und Bodenrückhalt (Kay et al. 2018)	Bestäuberpotenzial (Sutter et al. 2017) Nützlingspotenzial (Rega et al. 2018)	< 2 Völker ha ⁻¹ bestäubungsabhängige Kultur Sehr niedriges und niedriges Potenzial
Nein		
Nein		
U. a. traditionelle Systeme (Hochstammfeldobstbau, Wytweiden, Kastanienselven)		
Aufwertung des Gewässerraumes (McIvor et al. 2014)	Potenzieller Gewässerraum (eigene Berechnungen)	11 m Mindestbreite
Kohlenstoffsenke bzw. -speicher (Kay et al. 2019)		
Ammoniaksenke im Umkreis von Ammoniakquellen (Patterson et al. 2008)	Erhöhte Ammoniakkonzentrationen (Rhim and Achermann 2016)	> 3 µg m ⁻³ (in besonderen Biotopen für Pflanzen 2–4 µg m ⁻³ ; Moose 1 µg m ⁻³)
Nein		
Reduktion der Nitratauswaschung (Wolz et al. 2018; Manevski et al. 2019)	Stickstoff-Überschüsse (Prasuhn et al. 2016)	> 40 mg N l ⁻¹
Reduktion Phosphorausstrag (Schoumans et al. 2014)	Phosphor-Überschüsse (Prasuhn et al. 2016)	> 1 kg P ha ⁻¹ a ⁻¹
Nein		
Im Zusammenhang mit Ausscheidung und Aufwertung des Gewässerraums	Potenzieller Gewässerraum (eigene Berechnungen)	11 m Mindestbreite
Nein		
Nein		
Nein		
Erhöhung der Bodenstabilität (Murphy 2015)	Erosionsgefährdung (Bircher et al. 2018)	> 4 t Bodenverlust ha ⁻¹ a ⁻¹
Erhöhung des Bodenkohlenstoffs (Seitz et al. 2017)		
Reduktion des Bodenabtrags (McIvor et al. 2014)	Erosionsgefährdung (Bircher et al. 2018)	> 4t Bodenverlust ha ⁻¹ a ⁻¹
Nein		
Mikroklimatische Verbesserung u. a. als Schattenspende, Verdunstungsreduktion, Erhöhung Wasserhaltkapazität (Alam et al. 2014; Sánchez and McCollin 2015)	Temperaturanstieg (CH2011 2011) Niederschlagsveränderungen (CH2011 2011)	Extreme: oberstes Quantil (= 1/5 der Werte) Extreme: niedrigste und höchste Werte (= 1/5 der Werte)

Anhang B: Persönliche Kommunikation mit Keyline-Experte Georgi Pavlov

Auszug aus Email-Verkehr mit Keyline Experte Georgi Pavlov von der Firma Humadesign:



Georgi Pavlov [redacted]@gmail.com
to team, me ▾

Nov 4, 2022, 3:31 PM ☆ ↶ ⋮

Hey Diego, appreciate you writing to me about this.

If I could remake this book now I'd do it differently and elaborate a lot more on many things. That said, the concepts outlined in it still stand and we have applied them to many dozens of projects. So I can attest to their real world applicability.

Some 10 years after I made this book I am more than ever convinced that keypoints are irrelevant. It was a very useful concept once upon a time, no denying that, and I think there's still merit to learning it if for no other reason than to pay homage to the genius of P.A. Yeomans. But with our highly accurate topographic maps and extremely sophisticated modern software which allows us to predict the geometric relationship between the pattern and the underlying landscape, we don't need to concern ourselves with keypoints. P.A. Yeomans didn't have access to even a fraction of the technology we do nowadays so he had to come up with an easy to understand and apply concept that the farmers he was speaking to could use without necessarily needing to use surveying implements and contour maps (which were **extremely** rare back then). Even without modern software, I wouldn't use the concept because it is much more straightforward and, indeed, more accurate way of designing and applying these patterns than with the traditional method. I think I had somewhere even a video series, albeit very old and poorly made, on how to draw these by hand almost as fast as you would with CAD with nothing more than a pencil and a ruler.

Keypoints and the traditional approach to producing the cultivation pattern, are not very useful outside the context of the very gentle, settled landscapes like those of much of Australia. If you were to work on young landscapes for instance, you would find it impossible to produce any kind of viable or useful cultivation or planting pattern using the traditional methodologies. Also, if your design hinges on keypoints, what happens if keypoints lay outside the boundaries of the project area you're working on? Also, why are there no instances in any of the books of the pattern being applied continuously over large swaths of land? The traditional approach has many issues and it's no coincidence that it's become this ethereal thing that people struggle to understand and apply.

We should not forget that, ultimately, the design goal for any patterns we intend to apply to the landscape is the ease of application and, far more importantly, the ease of management over however long a time frame it is going to be in service for. The pattern must be as simple and predictable as possible without compromising its underlying function, which in the case of Keyline is **water control**. Now that may be drainage or retention or reticulation control.

In terms of application, it makes no difference whether you are working in CAD or on paper, **where you start the pattern from is arbitrary** (so not necessarily from the longest contour line or any other feature). What matters is that, upon offsetting upslope and/or downslope from the starting line, the pattern works according to your purposes relative to the landscape upslope or downslope from the starting point. If it doesn't, you make changes and try again until it is functionally as perfect as possible, geometrically as simple as possible, continuously as seamless as possible (e.g. in between different paddocks), and as predictable as possible. Now, it won't ever be entirely perfect in all of these aspects but it's good if it's as close as it can possibly be. Sometimes one pattern is not sufficient to cover the entire landscape without compromising on its functionality too much. If the compromise is not too bad, then you might want to go ahead and prioritize simplicity. But otherwise, you have to use multiple patterns while still trying to blend their geometries as seamlessly as possible so that management can be eased.

Hope that helps,

Best wishes

Anhang C: Karte mit Keyline-Muster für Grüezi Garten GmbH

