

Bachelorarbeit

Berechnung des Bewässerungsbedarfs
verschiedener Feldfrüchte am Beispiel Hebei
China

Daniel Brülisauer
Frederic Rüfenacht

10. Juni 2014

Betreuung: Wolfgang Kinzelbach, Sebastian Stoll, Ning Li

Umweltingenieurwissenschaften

ETH Zürich

Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit ist die Berechnung des Bewässerungsbedarfs für verschiedene Feldfrüchte am Beispiel Hebei, China. Dazu wurde von Herrn Sebastian Stoll ein MATLAB Programm zur Verfügung gestellt, welches den Bewässerungsbedarf abhängig von Ort, Pflanze, Datum der Aussaat, Feldkapazität, Welkepunkt und Bodenfeuchte berechnen kann. Das Programm wurde so erweitert, dass Verluste im Verteilkanal, bei der Bewässerung und durch den Salzgehalt berücksichtigt werden. Damit konnte anschliessend der kumulierte Bewässerungsbedarf verschiedener Feldfrüchte und Fruchtfolgen berechnet werden. Ausserdem wurde der Einfluss des Salzgehaltes und des Ortes untersucht und der Bewässerungsbedarf verschiedener Szenarien berechnet, welche gegenüber der heute üblichen Situation eine Reduktion von Bewässerungswasser versprechen.

Für die meisten der betrachteten Pflanzen wurde ein kumulierter Bewässerungsbedarf zwischen 65 und 95 Millimetern berechnet. Die in der Region beliebten Pflanzen Mais und Sorghum sind mit 71 resp. 69 mm eher sparsame Pflanzen, Baumwolle muss mit 95 mm vergleichsweise stark bewässert werden. Der einzige Ausreisser war die Kartoffel mit einem kumulierten Bewässerungsbedarf von 131 mm, was vor allem am ungünstig gewählten Datum der Aussaat lag. Bei den Fruchtfolgen hat sich die Kombination Sorghum und Winterweizen mit einem kumulierten Bewässerungsbedarf von 174 mm als die Effizienteste herausgestellt. Die in Hebei beliebte Fruchtfolge Mais und Winterweizen benötigt etwa 25 Millimeter mehr Bewässerungswasser. Auf eine Fruchtfolge mit Tomaten oder Kartoffeln im Sommer ist auf Grund des hohen Bewässerungsbedarfs wenn möglich zu verzichten. Um den Salzgehalt im Boden konstant zu halten, muss ein Teil des Bewässerungswassers für die Auswaschung des Bodens verwendet werden. Je höher der Salzgehalt im Bewässerungswasser, desto mehr Wasser wird für diese Auswaschung verwendet. Da bei effizienteren Bewässerungsmethoden weniger Wasser versickert, erreichen diese schneller den Punkt, bei welchem die Auswaschungsanforderung die Versickerung übersteigt. Die Effizienz der Bewässerung wird dadurch negativ beeinflusst. Bei Berechnung des Bewässerungsbedarfs verschiedener Regionen, wurde Handan mit den trockeneren Regionen Zhangye und Yanqi verglichen. Die Berechnungen ergaben, dass in Handan durchschnittlich 30 % weniger Bewässerungswasser benötigt wird als in Yanqi und sogar 35 % weniger als in Zhangye. Da in Handan vor allem Grundwasser für die Bewässerung verwendet wird und in manchen Regionen der Grundwasserspiegel dadurch stark abgesunken ist, wurden verschiedene Szenarien berechnet, mit welchen gegenüber der heute üblichen Situation Wasser gespart werden kann. Falls auf den Anbau von zwei Pflanzen im Jahr nicht verzichtet werden kann, ist die Abdichtung der Verteilkanäle eine gute Massnahme. So können etwa 20 % des Bewässerungswassers eingespart werden. Wenn nur noch Mais angebaut wird, ist eine Reduktion des Bewässerungswassers von über 60 % möglich, bei zusätzlichem Abdichten der Verteilkanäle könnten sogar über 70 % eingespart werden.

Abbildungsverzeichnis

1.	Lysimeter: Schematische Darstellung des Aufbaus	9
2.	Referenzevapotranspiration	10
3.	Evapotranspiration unter Standardbedingung	10
4.	Evapotranspiration unter nicht Standardbedingungen	11
5.	Flutbewässerung am Beispiel von Reis in China	12
6.	Furchenbewässerung für Salat	13
7.	Kreisförmige Sprinklerbewässerung für Salat	14
8.	Tröpfchenbewässerung	15
9.	Unterflurbewässerung in einem Fussballstadion	16
10.	Provinz Hebei, China	20
11.	Monatsniederschlag und Temperaturen für Handan	21
12.	Gemessener Grundwasserspiegel in Luancheng	22
13.	Geländekarte Chinas mit den wichtigen Städten	22
14.	Eingabeinterface	25
15.	1. Ausgabegraphik ohne Modifikationen	26
16.	2. Ausgabegraphik ohne Modifikationen	26
17.	Weg des Bewässerungswassers	27
18.	Ausgabetable des Programms	31
19.	Bewässerungsbedarf für Sorghum bei unterschiedlichem Salzgehalt	34
20.	Prozentuale Verluste des Bewässerungswassers mit steigendem Salzgehalt	35
21.	Kumulierter Bewässerungsbedarf von Kartoffeln in Abhängigkeit des Datums der Aussaat	38
22.	Monatlicher Niederschlag und durchschnittliche monatliche Temperatur von Zhangye	iii
23.	Monatlicher Niederschlag und durchschnittliche monatliche Temperatur von Yanqi	iii
24.	1. Ausgabegraphik mit Modifikationen	vii
25.	2. Ausgabegraphik mit Modifikationen	vii

Tabellenverzeichnis

1.	Effizienz des Verteilkanals nach FAO	28
2.	Vergleich der Effizienz verschiedener Bewässerungstypen	28
3.	Prozentuale Versickerungs- und Verdunstungsverluste bei der Bewässerung	29
4.	Eingabedaten in das modifizierte Programm	30
5.	Standarteingaben für die Berechnungen	32
6.	Salztoleranz und Datum der Aussaat für verschiedene Pflanzen	32
7.	Berechnung des kumulierten Bewässerungsbedarfs für verschiedene Pflanzen	33
8.	Der kumulierte Bewässerungsbedarf für verschiedene Fruchtfolgen	34
9.	Angaben für die Berechnungen für die Orte Handan, Zhangye und Yanqi .	36
10.	Kumulierter Bewässerungsbedarf von Feldfrüchten für Handan, Zhangye und Yanqi	36
11.	Kumulierter Bewässerungsbedarf für verschiedene Szenarien	37
12.	Umrechnungsfaktoren für <i>ppm</i> und <i>meq/L</i>	i
13.	Im Programm implementieren Pflanzen mit Salztoleranzparametern	iv

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	7
2. Einführung in die Thematik	8
2.1. Wasserbedarf einer Pflanze	8
2.1.1. Evapotranspiration	8
2.1.1.1. Evaporation	8
2.1.1.2. Transpiration	8
2.1.2. Messung des Wasserbedarfs	9
2.1.2.1. K_c - Faktor	10
2.1.2.2. K_s - Faktor	10
2.2. Bewässerungsarten	11
2.2.1. Flutbewässerung	11
2.2.2. Oberflächenbewässerung	12
2.2.3. Sprinklerbewässerung	13
2.2.4. Tröpfchenbewässerung	14
2.2.5. Unterflurbewässerung	15
2.3. Salzgehalt	17
2.3.1. Definition und Einheiten	17
2.3.2. Zusammensetzung des Bewässerungswassers	17
2.3.3. Elektrische Leitfähigkeit des Wassers	18
2.3.4. Einfluss des Salzes auf die Pflanzen	18
2.4. Provinz Hebei, China	20
2.4.1. Übersicht Hebei/Handan	20
2.4.2. Weitere Regionen in China	22
3. Berechnung des Bewässerungsbedarfs	23
3.1. Ursprüngliches Programm	23
3.1.1. Verwendete Formel	23
3.1.1.1. Abbau des Wurzelwassers: $D_{r,i}$	23
3.1.1.2. Steighöhe vom Grundwasser (CR)	24
3.1.1.3. Wasserverlust aus der Wurzelzone durch Versickern (DP)	24
3.1.2. Das Eingabeinterface	24
3.1.3. Output des Programms	24
3.1.4. Anwendungsbeispiel	25
3.2. Modifikationen	27
3.2.1. Flussdiagramm Bewässerungsverluste	27
3.2.2. Verluste durch den Transport zum Feld	28
3.2.3. Verluste durch Bewässerung	28
3.2.4. Verluste durch den Salzgehalt	29
3.2.5. Berechnung der Bewässerungseffizienz	30
3.2.6. Anwendungsbeispiel	30

4. Berechnung und Resultate	32
4.1. Standardeingaben	32
4.2. Verschiedene Fruchtfolgen	33
4.2.1. Single Cropping	33
4.2.2. Double Cropping	33
4.3. Einfluss des Salzgehaltes	34
4.4. Einfluss des Ortes	35
4.5. Unterschiedliche Szenarien als wassersparende Massnahmen	36
5. Diskussion der Resultate	38
5.1. Verschiedene Feldfrüchte und Fruchtfolgen	38
5.2. Einfluss des Salzgehaltes	39
5.3. Einfluss des Ortes	40
5.4. Verschiedene Szenarien als wassersparende Massnahmen	40
A. Anhang	i
A.1. Salzgehalt	i
A.2. Umrechnung der elektrischen Leitfähigkeit	i
A.3. Rechenbeispiel zum Einfluss des Salzes auf den Ertrag	ii
A.4. Klimadiagramme von Yanqi und Zhangye	iii
A.5. Salztoleranzparameter	iv
A.6. Rechenbeispiel zur Berechnung der Effizienz	v
A.6.1. Beispiel 1	v
A.6.2. Beispiel 2	v
A.7. Ausgabebilder des modifizierten Programms	vii
B. Literaturverzeichnis	viii

1. Einleitung

„In 2030, 47 % of world population will be living in areas of high water stress.“
(UNESCO, 2009) [1]

Dieses Zitat zeigt deutlich die zukünftige Wasserproblematik. Dabei spricht man von Wasserstress, wenn pro Einwohner und Jahr zwischen 1000 m^3 und 1700 m^3 Wasser zur Verfügung stehen und von extremen Wasserstress bei weniger als 1000 m^3 pro Einwohner und Jahr [2].

Die Wasserverfügbarkeit ist zum einen abhängig von der verfügbaren erneuerbaren Ressource und zum anderen von der Entnahme dieser Ressource. Übersteigt die Entnahme einen gewissen Wert der verfügbaren erneuerbaren Ressource, so spricht man vom Wasserstress [3]. Es leiden gegenwärtig rund 2.3 Milliarden Menschen unter extremen Wasserstress (Stand 2007)[4].

Bis Mitte des Jahrhunderts wird sich diese Zahl mehr als verdoppeln. Die Gründe dafür liegen in der Bevölkerungszunahme, dem Wirtschaftswachstum und der erhöhten Wasserentnahme zur Bewässerung von Feldern. Dazu kommt der Klimawandel, welcher nach Modellrechnungen den Wasserstress in 61-75 % der Landoberfläche erhöht und in 14-29 % verringert. Der Wasserstress wird vor allem dort zunehmen, wo jetzt schon Wasserstress vorherrscht. So zum Beispiel im Nordosten Brasiliens, in Teilen von Nordamerika, Südeuropa, Teile von Mittelasien und Australien und grosse Teile von Afrikas [3].

Vergleicht man diese Gebiete nun mit denjenigen, auf denen intensiv Ackerbau mit Bewässerung betrieben wird, so erkennt man eine düstere Tendenz. So wird in den bedrohten Gebieten meist mehr als 70 % der Wasserentnahme für die Landwirtschaft benützt [5]. Dies liegt daran, dass diese Gebiete oftmals arid sind und daher auf eine Bewässerung in der Landwirtschaft angewiesen sind.

In China liegt die Wasserentnahme für die Landwirtschaft bei 63 % bis 79 % des gesamten Süsswasserverbrauchs [5]. So nahm der Grundwasserspiegel in Luangchen, Provinz Hebei, während den Jahren 1974 bis 2002 um 20 m ab [6]. Um diesem Abfall des Grundwassers und somit auch dem Wasserstress entgegen zu wirken, ist es notwendig, Gegenmassnahmen zu treffen.

Eine dieser Massnahmen ist die Reduktion des Bewässerungsbedarfs. Dies kann zum einen erreicht werden, in dem man die Verluste des Bewässerungswassers durch den Transport zum Feld und durch die Bewässerungsmethode mindert, zum anderen durch die Wahl einer für diese Region effizienteren Pflanze und eines optimierten Aussaatdatums. Um all diese Möglichkeiten einfach vergleichen zu können, wird ein leistungsstarkes Programm benötigt, welches einfach in der Handhabung ist und die nötigen Informationen klar und intuitiv darstellt. So können verschiedene Szenarien durchgespielt werden und dadurch bessere Strategien für die Landwirtschaft in Hebei gefunden werden.

2. Einführung in die Thematik

2.1. Wasserbedarf einer Pflanze

2.1.1. Evapotranspiration

Die Evapotranspiration beinhaltet zwei separate Prozesse, dies ist zum einen der Wasserverlust durch die Evaporation und zum anderen der durch die Transpiration. Bei welchem Prozess nun welche Menge an Wasser evaporiert bzw. transpiriert kann nicht ohne weiteres gesagt werden, da im Verlaufe der Wachstumsphase der Pflanze die Transpiration zunimmt und im Gegenzug die Evaporation abnimmt [7].

2.1.1.1. Evaporation

Die Evaporation ist der Prozess, wo flüssiges Wasser verdampft. Dazu wird Energie benötigt, welche vor allem aus der Sonneneinstrahlung kommt. Die treibende Kraft ist der Gradient des Wasserdampfdruckes an der Oberfläche und der umgebenden Atmosphäre. Steigt der Wasserdampfdruck in der Atmosphäre, so nimmt die Evaporation ab [7].

2.1.1.2. Transpiration

Geht es um den Wasserbedarf einer Pflanze, so betrachtet man die Transpiration dieser Pflanze. Der Grossteil des Wassers, welches durch die Pflanze aufgenommen wird, wird durch die Transpiration verdunstet [7]. Die Transpiration bezeichnet die Abgabe von Wasserdampf an die Umgebung durch Diffusion über die Spaltenöffnungen in den Blättern. Diese Spalten können durch die Spaltungsöffnungsbewegungen reguliert werden. Die treibende Kraft der Transpiration ist der Gradient zwischen der relativen Luftfeuchtigkeit und der Bodenfeuchte. Dadurch wird ein Transpirationsstrom erzeugt, für welchen keine Energie aufgebracht werden muss. Somit wird die Pflanze mit Wasser und Nährstoffen versorgt [8]. Die Transpiration ist abhängig von folgenden Faktoren [9]:

- Temperatur: Die Transpiration nimmt mit steigender Temperatur zu
- Relative Luftfeuchtigkeit: Die Transpiration nimmt mit steigender relativer Luftfeuchtigkeit ab
- Wind: Die Transpiration nimmt mit zunehmendem Wind zu
- Bodenfeuchte: Die Transpiration nimmt mit abnehmender Bodenfeuchte ab
- Pflanzentyp

Die Transpirationsrate, also die Menge von Wasser, welche pro Zeiteinheit durch Transpiration an die Atmosphäre abgegeben wird, kann mit der Gleichung (1) berechnet werden [8].

$$E = \frac{c_i - c_a}{r_s + r_b} \quad (1)$$

- c_i Wasserkonzentration in der Pflanze [g/m^3]
- c_a Wasserkonzentration ausserhalb der Pflanze [g/m^3]
- r_s Stomatawiderstand [s/m]
- r_b Grenzschichtwiderstand [s/m]

2.1.2. Messung des Wasserbedarfs

Das verbreitetste Verfahren zur Messung der Evapotranspiration (ET) funktioniert mit Hilfe eines Lysimeters (Abb. 1). Ein Lysimeter ist eine Messanlage zur Bestimmung des Wasserhaushaltes eines eingebrachten Bodenkörpers mit bekannten Spezifikationen (Abmessungen, Bodeneigenschaften und Vegetation). Zur Bestimmung der tatsächlichen Verdunstung wird ein längerer Zeitraum betrachtet. Es wird ein Referenzgras angepflanzt, welches ausreichend gewässert wird. Durch die regelmässige Messung des Gewichtes und der daraus folgenden Gewichtsänderung (ΔW), kann die Änderung des Wasserhaushaltes bestimmt werden. Zieht man der Gewichtsänderung das Gewicht des Sickerwassers (SW) ab, so erhält man die Evapotranspiration (Et_a). Dies entspricht der Referenzevapotranspiration (ET_0) und wird schematisch in der Abbildung (2) dargestellt.

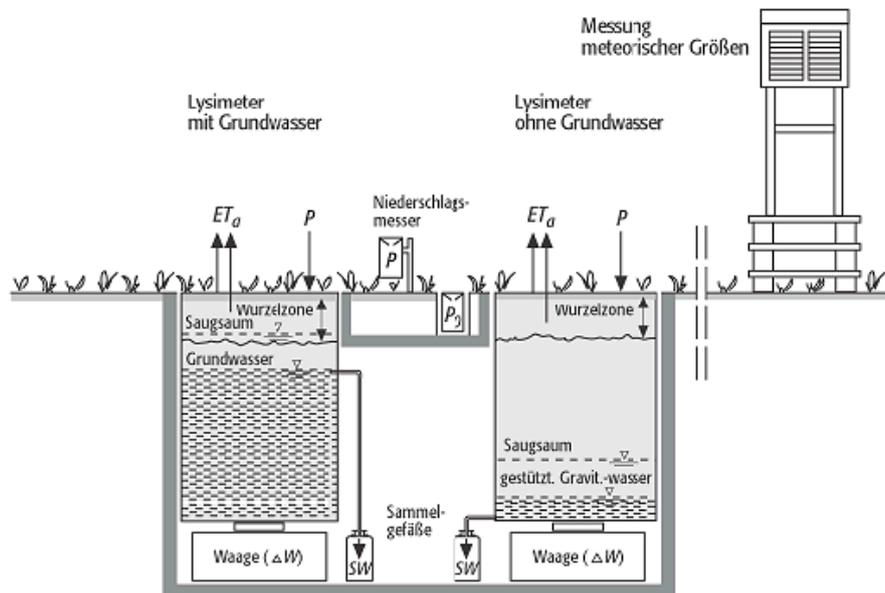


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Aufbaus eines Lysimeters mit und ohne Grundwasser. P : Niederschlag, ET_a : Evapotranspiration, SW : Sickerwasser, W : Gewichtsänderung [10]

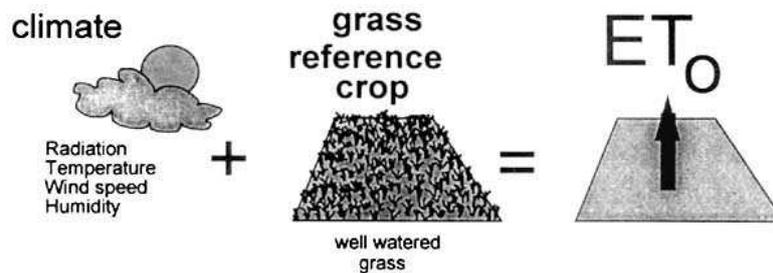


Abbildung 2: Referenzevapotranspiration (ET_0) schematisch dargestellt [11]

2.1.2.1. K_c - Faktor

Zur Berechnung der Evapotranspiration einer anderen Pflanze (ET_c) wird der Pflanzenfaktor (K_c) mit der Referenzevapotranspiration (ET_0) multipliziert (Abb. 3). Dies gilt für Standardbedingung, was heisst, dass die Bodenfeuchte für das Wachstum der Pflanze optimal ist. Der Pflanzenfaktor ändert sich über die Wachstumsphase der Pflanze und wird in der Pflanzenfaktorkurve dargestellt. Um diese darzustellen werden drei Werte von K_c benötigt. Das sind $K_{c,ini}$, welches den Beginn der Wachstumsphase charakterisiert, $K_{c,mid}$, welches die mittlere Wachstumsphase darstellt, und $K_{c,end}$, welches den letzten Teil des Zyklus der Pflanze beschreibt [7].

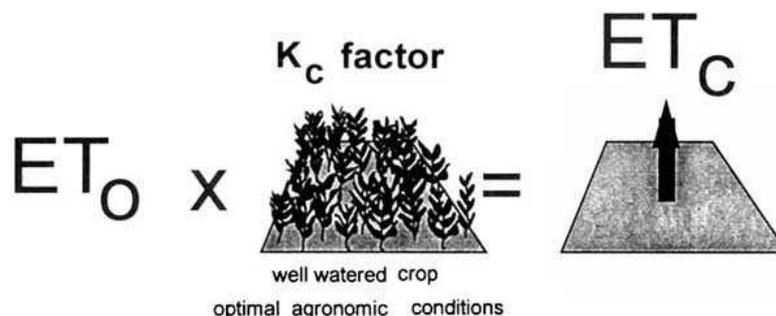


Abbildung 3: Evapotranspiration der Pflanze (ET_c) unter Standardbedingung. ET_0 Referenzevapotranspiration, K_c Pflanzenfaktor [11]

2.1.2.2. K_s - Faktor

Bei nicht Standardbedingung steht der Pflanze nicht genügend Wasser zur Verfügung, was zur Folge hat, dass die Pflanze unter Stress steht. Somit nimmt die Evapotranspiration (ET_c) ab. Mit Einbindung eines Stressfaktors kann dies mathematisch eingebunden werden. Durch Multiplikation der Evapotranspiration (ET_c) mit dem Stressfaktor (K_s) erhält man die Evapotranspiration unter nicht Standardbedingungen [7]. In Abbildung 4 ist dies schematisch dargestellt.

$$ET_0 \times K_s \times K_c \text{ adjusted} = ET_c \text{ adj}$$

Abbildung 4: Evapotranspiration der Pflanze ($ET_{c,adj}$) unter nicht Standardbedingungen. ET_0 : Reverenzevapotranspiration, K_c : Pflanzenfaktor, K_s : Stressfaktor [11]

2.2. Bewässerungsarten

Zur Bewässerung der Pflanzen werden verschiedene Bewässerungsmethoden angewendet. Im Folgenden wird auf die häufigsten dieser Methoden kurz eingegangen. Dabei wird vor allem die Effizienz der Bewässerungsart betrachtet, welche unter anderem von Umsetzung, eingesetztem Material, Wartung, Management etc. abhängt. Trotzdem sollen die angegebenen Werte eine Idee liefern, in welchem Bereich sich die Effizienzen der einzelnen Bewässerungsmethoden bewegen. Des Weiteren sind die Installationskosten der einzelnen Methoden unterschiedlich, was auch einen Einfluss darauf hat, auf welche Methode zur Bewässerung zurückgegriffen wird.

2.2.1. Flutbewässerung

Die Flutbewässerung ist eine alte Methode zur Bewässerung von Pflanzen. Es ist vermutlich die erste Bewässerungsart, welche die Menschen zur Kultivierung von Pflanzen benutzten [13]. Noch heute ist sie die häufigste verwendete Bewässerungsmethode. Die Bewässerung ist sehr einfach. Mithilfe von Kanälen wird Bewässerungswasser zum Feld transportiert und dort eingeleitet. So kann das Wasser sich gleichmässig auf der Oberfläche des Feldes verteilen. Die Effizienz der Flutbewässerung bewegt sich um 50%. Der Rest verdunstet, fließt ab oder versickert. Es gibt mehrere Methoden zur Erhöhung der Effizienz von Flutbewässerung [14]:

- Bodenebnung: So dass erhöhte Stellen im Feld auch mit dem Bewässerungswasser reicht werden.
- Stossweise Bewässerung: Abgabe des Bewässerungswassers in Intervallen, so dass es Zeit zum Infiltrieren hat. Dies Verringert den Oberflächenabfluss.
- Wiederverwendung des Oberflächenabflusses: Bewässerungswasser, welches als Oberflächenwasser abfließt soll aufgefangen werden und zur Wiederverwendung hoch gepumpt werden.

Typische Pflanzen, welche mit dieser Methode bewässert werden, sind Reis (Abb. 5) und Weizen.



Abbildung 5: Flutbewässerung am Beispiel von Reis in China [15]

2.2.2. Oberflächenbewässerung

Bei der Oberflächenbewässerung wird wie bei der Flutbewässerung das Wasser mit Hilfe der Gravitation verteilt. Dabei wird aber nicht der ganze Boden überflutet. Die Effizienz der Oberflächenbewässerung beträgt etwa 60 % [17]. Die Oberflächenbewässerung kann in drei verschiedene Typen aufgeteilt werden [16]:

- **Beckenbewässerung:** Die meist kleinen Felder sind mit einem Damm umgeben, so dass es zu keinem Oberflächenabfluss kommen kann. Das Becken kann gefurcht oder geriffelt sein. Des Weiteren kann es ein erhöhtes Bett haben, welches einige Pflanzen bevorzugen. In Gebieten, wo hohe Niederschlagsspitzen vorkommen, kann es passieren, dass zu viel Wasser im Becken ist. Um dem entgegen zu wirken kann man Notfalldrainagen anlegen.
- **Streifenbewässerung:** Die Streifenbewässerung kann als Erweiterung der Beckenbewässerung betrachtet werden. Das Feld wird in Streifen aufgeteilt, welche separat bewässert werden können. Wird der Zufluss vom Bewässerungswasser gestoppt, so fließt es entlang des abfallenden Bodens. Dementsprechend muss das Feld mit einem geringen Gefälle beschaffen sein. Es können fast alle Pflanzen durch Streifenbewässerung bewässert werden.
- **Furchenbewässerung:** Die Furchenbewässerung überflutet nicht das ganze Feld, sondern lässt das Bewässerungswasser entlang von Furchen fließen. Das Wasser infiltriert und verteilt sich vertikal und horizontal im Boden. Der Vorteil der Furchenbewässerung ist, dass die Wassermenge für jede einzelne Furche separat eingestellt

werden kann. Dem gegenüber kann bei der Beckenbewässerung oder Streifenbewässerung die Wassermenge nur pro Becken respektive Streifen eingestellt werden. Mögliche Nachteile der Furchenbewässerung sind eine Anreicherung des Salzgehaltes in den Furchen, die Erschwerung des Transportes von Agrarmaschinen durch das Feld, hohe Kosten und Mehraufwand fürs Furchen und erhöhte Erosion durch das Bewässerungswasser. In der Abbildung 6 wird ein typisches Beispiel für Furchenbewässerung gezeigt.



Abbildung 6: Furchenbewässerung für Salat [18]

2.2.3. Sprinklerbewässerung

Mit Sprinklerbewässerung wird Wasser in Form von künstlichem Regen auf das Feld gesprüht (Abb. 7). Um dies zu erreichen, wird Bewässerungswasser mit Druck durch eine Sprühdüse befördert. Daraus folgen durch den Sprinklerkopf die typischen Muster der Sprinklerbewässerung. Diese typischen Muster sind entweder geradlinig oder kreisförmig. Kreisförmige Sprinkleranlagen haben einen Radius von 0.92 m bis 30.48 m. Sie werden klassifiziert durch ihren Radius, Drehwinkel und Sprühwinkel. So kann der Drehwinkel im Bereich von 0° bis 360° reichen. Der Sprühwinkel liegt im Bereich von 0° bis 35° , wobei der Standardsprühwinkel bei 25° bis 28° liegt [19].

Die Effizienz der Sprinklerbewässerung liegt bei etwa 75 % [17]. Im Allgemeinen können durch die Sprinkler alle Pflanzen bewässert werden. Grosse Sprinkler können aber empfindliche Pflanzen durch ihre grossen Tropfen beschädigen. Daher sollte für solche Pflanzen die Tröpfchengrösse angepasst werden.

Im Gegensatz zur Flut- und Oberflächenbewässerung ist die Sprinklerbewässerung nicht auf flache Felder angewiesen.

Bezüglich des Bodens kann gesagt werden, dass vor allem auf sandigen Böden der Sprinkler gut geeignet ist. Bei Böden, welche schnell eine Kruste bilden ist die Sprinklerbewäs-

serung nur bedingt einsetzbar. Sollte dies aber trotzdem nötig sein, so sind Sprinkler mit kleineren Tropfen vorzuziehen.

Zur Vermeidung von Problemen sollte das Bewässerungswasser frei von Sedimenten sein. Diese können die Düsen blockieren [20].



Abbildung 7: Kreisförmige Sprinklerbewässerung für Salat [21]

2.2.4. Tröpfchenbewässerung

Bei der Tröpfchenbewässerung wird das Bewässerungswasser mit Hilfe von Schläuchen durch das Feld transportiert (Abb. 8). In regelmässigen Abständen haben die Schläuche Auslässe, durch welche das Wasser der Pflanze tröpfchenweise abgegeben wird. Dadurch wird nicht der ganze Boden sondern nur die Pflanze bewässert, wodurch eine Effizienz von bis zu 90 % erreicht werden kann [17]. Bei der Tröpfchenbewässerung wird öfters am Tag kurz bewässert, was zu einem Boden mit hoher Bodenfeuchte führt. Dies wiederum lässt Pflanzen besser gedeihen. Geeignet für die Tröpfchenbewässerung sind vor allem Pflanzen die in Reihen angepflanzt werden können (Gemüse, Früchte, Bäume und Trauben). Im Allgemeinen werden besonders ertragreiche Pflanzen durch die Tröpfchenbewässerung bewässert, da die Installationskosten sehr hoch sind.

Die Tröpfchenbewässerung kann bei jedem Bodentyp eingesetzt werden. Die Menge und der Durchfluss des Bewässerungswassers sollte jedoch dem Bodentyp entsprechend angepasst werden. So sollte bei tonhaltigen Böden die Frequenz der Wasserabgabe zur Vermeidung von Pfützenbildung und Oberflächenabfluss vermindert werden. Im Gegenzug braucht ein sandiger Boden mehr Wasser.

Wie auch bei der Sprinklerbewässerung spielt hier die Wasserqualität eine grosse Rolle da die Auslässe einen Durchmesser von nur 0.2-2.0 mm haben. Es ist deshalb wichtig, dass das Bewässerungswasser frei von Sedimenten ist. Weiter können auch Düngerrückstände, Algen und ungelöste Chemikalien, wie zum Beispiel Kalzium oder Eisen, die

Auslässe verstopfen.

Durch die hohe Effizienz kann es dazu kommen, dass Salz im Boden angereichert wird [22]. Die Kosten für die Tröpfchenbewässerung bewegen sich im Bereich von 500 bis 1200 \$/acre¹ [24].



Abbildung 8: Tröpfchenbewässerung in Israel [23]

2.2.5. Unterflurbewässerung

Bei der Unterflurbewässerung kommen vergrabene Röhren oder Matten, welche wie bei der Tröpfchenbewässerung mit Auslässen versehen sind, zum Einsatz. Da das Bewässerungswasser im Boden abgegeben wird, sind Effekte wie Krustenbildung, Pfützenbildung und potentieller Oberflächenabfluss eliminiert.

Im Allgemeinen können fast alle Pflanzen durch die Unterflurbewässerung bewässert werden. Am Meisten wird diese Methode für hochwertiges Gemüse, Rasen (vgl. Abb. 9) und in der Landschaftsgärtnerei benutzt. So haben Erdbeeren, Tomaten, Kartoffeln, Cantaloupe-Melonen, Zwiebeln und andere Gemüse durch diese Bewässerungsmethode sowohl eine Steigerung im Ertrag als auch in der Qualität erfahren [25]. Flachwurzeln Pflanzen haben mit der Unterflurbewässerung je nach Tiefe ihre Probleme und wären besser bedient mit einer Oberflächenbewässerung.

Wie bei der Tröpfchenbewässerung muss auf die Reinheit des Bewässerungswassers geachtet werden. Anderenfalls muss ein Filtersystem eingebaut werden. Dabei sollten Partikel, welche ungefähr 1/4 des Durchmessers der Auslässe oder grösser sind, rausgefiltert werden. Dafür gut geeignet sind Siebfilter in Kombination mit nachgeschaltetem Sandfilter.

¹Die *Acre* ist eine alte Masseinheit zur Flächenbestimmung. Sie hat eine Fläche von 66 x 660 Fuss, was etwa 0.4 ha entspricht.

Ein weiterer Vorteil dieser Technik ist, dass das Feld ungestört mit Maschinen bearbeitet werden kann, ohne dass Leitungen, Kanäle oder Sprinkler aus dem Weg geschafft werden müssen oder sogar beschädigt werden. Die Kosten einer Unterflurbewässerung liegen je nach Wasserquelle, Qualität, Filter, Materialwahl, Bodencharakteristika und Grad der Automatisierung im Bereich von 1000 bis 2000 \$/acre. Ein solches System ist auf 12 bis 15 Jahre ausgelegt [25].

Die Effizienz der Unterflurbewässerung liegt bei mindestens 95 % [26].



Abbildung 9: Unterflurbewässerung in einem Fussballstadion [27]

2.3. Salzgehalt

In diesem Abschnitt wird der Salzgehalt betrachtet. Dabei werden in einem ersten Teil die grundlegenden Definitionen aufgezeigt und erklärt. Weiter werden die einzelnen Ionen der Salze im Bewässerungswasser beschrieben und erklärt, wie man sie misst. Schlussendlich wird noch der Einfluss des Salzes auf die Pflanzen erklärt.

2.3.1. Definition und Einheiten

Die Salzkonzentration und das total gelöste Salz (TDS) kann entweder in Gewichts- oder Volumenkonzentration angegeben werden. So gibt es für die Gewichtskonzentration die Einheiten:

- parts per million (*ppm*)
- percent concentration (*%C*)
- milligrams per kilogram (*mg/kg*)

Für Volumenkonzentrationen sind die gängigen Einheiten:

- milligrams per liter (*mg/L*)
- milliequivalents per liter (*meq/L*)
- millimoles of charge per liter (*mmol_c/L*)

Dabei ist *mmol_c/L* die SI-Einheit wenn es um die Salzkonzentration im Wasser geht. Für die Umrechnung von *mg/L* in *meq/L* gibt es in der Tabelle 12 im Anhang A.1 die Umwandlungsfaktoren [29].

2.3.2. Zusammensetzung des Bewässerungswassers

Bewässerungswasser beinhaltet immer auch gelöste Mineralsalze. Dabei unterscheiden sie sich in der Konzentration und Zusammensetzung der gelösten Salze. Die Unterschiede entstehen durch verschiedene Quellen des Wassers und durch die Jahreszeiten.

Gelöstes Salz kommt in Form von Ionen vor. Dabei gibt es Kationen, welche positiv geladen sind, und Anionen, welche negativ geladen sind. Den grössten Anteil machen die folgenden Ionen aus:

- Kationen:
 - Natrium (Na^+)
 - Kalzium (Ca^{2+})
 - Magnesium (Mg^{2+})

- Anionen:
 - Chlorid (Cl^-)
 - Sulfat (SO_4^-)
 - Bikarbonat (HCO_3^-)

Des Weiteren gibt es Kalium (K^+), Karbonat (CO_3^{2-}) und Bor (B). Die Konzentration von Kalium ist sehr gering durch die Interaktion mit Bodenpartikeln. Die Karbonatkonzentration im Bewässerungswasser kann bis zu einem pH von 8.0 vernachlässigt werden. Im Grundwasser kann Bor in hohen Konzentrationen vorkommen, im Oberflächenwasser ist dies aber die Ausnahme. Bor wird in geringen Mengen von Pflanzen benötigt, steigt aber die Konzentration nur geringfügig über den Toleranzwert, so wirkt Bor toxisch [29].

2.3.3. Elektrische Leitfähigkeit des Wassers

Zur Bestimmung des Salzgehaltes im Boden sind direkte Methoden ungeeignet. Deshalb wird die elektrische Leitfähigkeit des Wassers gemessen. Wie im Kapitel 2.3.2 erwähnt, kommt gelöstes Salz in Form von Ionen vor. Diese sind positiv oder negativ geladen. Legt man nun im Wasser eine Spannung an, so bewegen sich die Kationen zur Anode und die Anionen zur Kathode. Diese Bewegung der Ionen lässt das Wasser Strom leiten. Die daraus folgende elektrische Leitfähigkeit kann gemessen werden. Je höher die Konzentration des Salzes, desto grösser ist die elektrische Leitfähigkeit. Die Einheit der elektrischen Leitfähigkeit ist Dezisiemens pro Meter (dS/m). Die Umrechnung der elektrischen Leitfähigkeit in eine Volumenkonzentration ist im Anhang A.2 dargestellt.

2.3.4. Einfluss des Salzes auf die Pflanzen

Sowohl Boden, als auch Bewässerungswasser enthalten eine gewisse Konzentration an Salzen. Solange diese Konzentration nicht über den spezifischen Toleranzwert der Pflanze steigt, hat der Salzgehalt kaum Einfluss auf Wachstum und Ertrag der Pflanze. Das gelöste Salz im Bodenwasser kann das Wachstum und den Ertrag entweder durch osmotischen Einfluss oder durch Toxizität mindern.

Beim osmotischen Effekt geht es darum, dass normalerweise die Konzentration von gelösten Substanzen in der Pflanze höher sind als im Bodenwasser. Dieser Gradient ermöglicht es dem Wasser ohne Energieaufwand in die Wurzeln zu wandern. Steigt nun der Salzgehalt im Bodenwasser, so nimmt der Gradient ab und es kann weniger Wasser aufgenommen werden. Um dem entgegenzuwirken muss die Pflanze sich entweder mit Salzen anreichern, oder organische Verbindungen aufbauen (z.B. Zucker oder organische Säuren). Diese Prozesse benötigen Energie, welche eigentlich für das Wachstum benötigt worden wären. Deshalb nehmen Wachstum und Ertrag bei zu hohem Salzgehalt im Bodenwasser ab.

Durch die Toxizität von hohen Konzentrationen von Chlorid (Cl^-) und Natrium (Na^+) für Pflanzen kann das Wachstum gestört werden. Anfällig sind vor allem baumartige Pflanzen wie Reben, Avocado, Zitruspflanzen und Steinfrüchte.

Im Allgemeinen ist der Salztoleranzwert einer Pflanze kein exakter Wert. Er ist unter anderem abhängig von Salzart, Klima, Bodeneigenschaften und Pflanzenalter. Deshalb haben Landwirte den Salztoleranzwert so definiert, dass bei einer Überschreitung der Ertrag abnimmt. Der Grenzwert ist abhängig von der Pflanze. Wird der Grenzwert überschritten, so ist der Ertrag anhand der Gleichung (2) zu berechnen [30].

$$Y = 100 - B(EC_e - A) \quad (2)$$

- Y relativer Ertrag, in [%]
 A Grenzwert der Pflanze, in [dS/m]
 B lineare Abnahme des Ertrags pro dS/m Zunahme, in [%]/(dS/m)
 EC_e mittlerer Salzgehalt der Wurzelzone [dS/m]

Für einige ausgewählte Pflanzen findet man in der Tabelle 13 im Anhang A.5 Werte für A und B . Ein Rechenbeispiel gibt es im Anhang A.3. Eine Auswahl von Daten gibt die Publikation „Agricultural Drainage Water Management in Arid and Semi-Arid Areas“ von FAO (2003).

Auf den Einfluss des Klimas (Luftfeuchtigkeit) oder der Bodeneigenschaften (Gipsgehalt) wird hier nicht explizit eingegangen.

2.4. Provinz Hebei, China

2.4.1. Übersicht Hebei/Handan

Die Provinz Hebei liegt im Nordosten Chinas, hat eine Fläche von $187\,000\text{ km}^2$ und eine Bevölkerung von 67.35 Millionen Einwohnern [31]. Abbildung 10 gibt eine Übersicht über die Provinz. Der Süden Hebeis ist Teil des North China Plains, Chinas Hauptproduktionsstandort von Mais, Baumwolle, Hirse und Sorghum. Des Weiteren wird Winterweizen, Süsskartoffeln und Gemüse angebaut. Baumwolle wird dabei vor allem auf salzhaltigen Böden angebaut, da diese eine vergleichsweise hohe Salztoleranz aufweist. Auf vielen Feldern wird Double Cropping betrieben. Das heisst, dass übers Jahr gesehen mehr als eine Feldfrucht angebaut wird. Meistens handelt es sich dabei im Sommer um Mais und im Winter um Winterweizen. Es sind aber auch andere Fruchtfolgen wie beispielsweise Süsskartoffel/Winterweizen, Gemüse/Winterweizen oder Hirse/Winterweizen denkbar. Ausserdem können im Winter auch Zwiebeln angebaut werden.



Abbildung 10: Provinz Hebei, China [32]

Für die Berechnungen des Bewässerungsbedarfs wurde die Region um Handan, eine Stadt im Süden Hebei's, gewählt. In Abbildung 11 ist das örtliche Klima abgebildet. Der durchschnittliche jährliche Niederschlag von 610 Millimetern würde theoretisch ausreichen um Pflanzen ohne zusätzliche Bewässerung anzubauen. Da der grösste Teil des Niederschlags jedoch während nur weniger Monaten im Sommer fällt, kann dennoch nicht auf die Bewässerung verzichtet werden. In der Region um Handan wird das Bewässerungswasser im Normalfall mit Erdschüttungskanälen zum Feld gebracht. Bewässert wird meist mit Unterflurbewässerung. Das verwendete Bewässerungswasser besteht hauptsächlich aus

Grundwasser. Dabei stehen verschieden salzhaltige Aquifere zur Verfügung. So gibt es Frischwasseraquifere mit Salzgehalten zwischen $1.1 - 1.6 \text{ dS/m}$ und salzhaltige Aquifere mit Salzgehalten zwischen $2.73 - 7.09 \text{ dS/m}$. Salzhaltige Aquifere in einer Tiefe von $10 - 20 \text{ m}$ decken im North China Plain eine Fläche von ungefähr $47\,000 \text{ km}^2$ ab und besitzen ein geschätztes Volumen von etwa 5.4 Milliarden m^3 [34].

Die starke Bewässerung der vergangenen Jahre verursacht aber auch Probleme. Abbildung 12 zeigt die gemessenen Pegelstände des Grundwassers in der Nähe von Luancheng, einer Stadt circa 150 km nördlich von Hebei, zwischen 1974 und 2002. Es ist erkennbar, dass der Grundwasserspiegel in diesem Zeitraum um fast 20 Meter gesunken ist. Zum Schutz der Aquifere ist es wichtig, dass der Bewässerungsbedarf so genau wie möglich berechnet werden kann. Nur so kann das Wasser sinnvoll verwaltet werden und wenn nötig Lösungen gefunden werden, um den Bewässerungsbedarf zu minimieren.

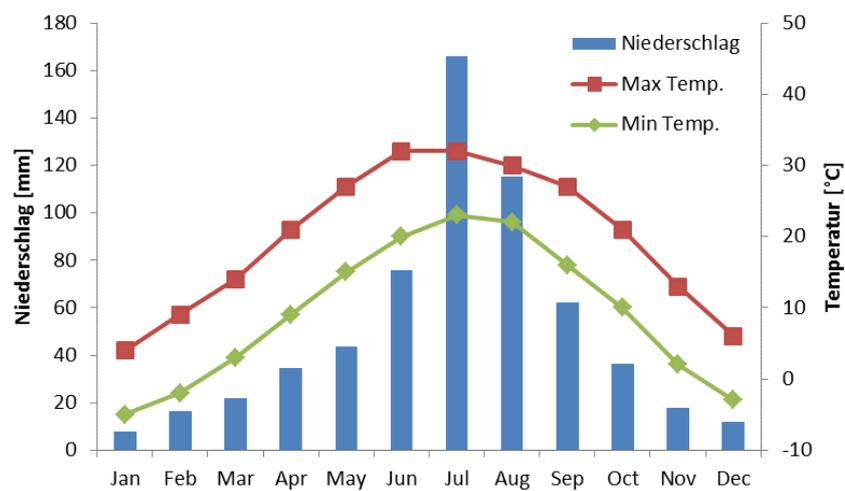


Abbildung 11: Durchschnittlicher Monatsniederschlag und Temperaturen für Handan, Hebei, China [33]

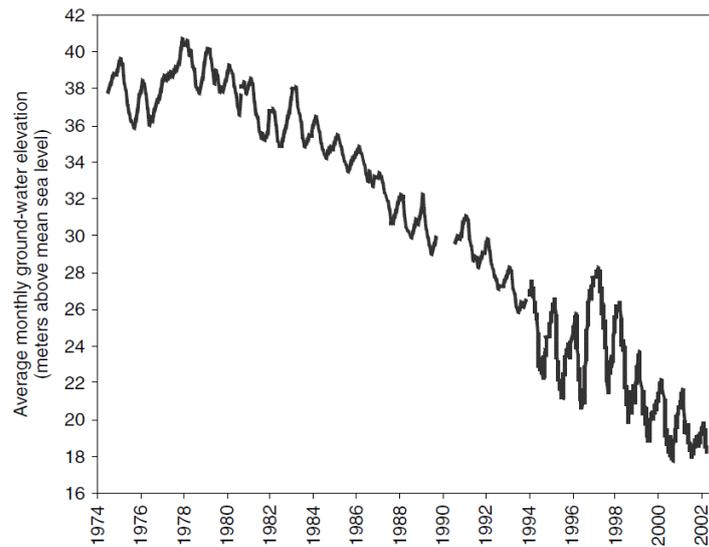


Abbildung 12: Gemessener Grundwasserspiegel in Luancheng, Hebei, China zwischen 1974 und 2002 [35]

2.4.2. Weitere Regionen in China

Um die Berechnungen des kumulierten Bewässerungsbedarfs mit Handan vergleichen zu können wurden zwei weitere Regionen Chinas betrachtet. Namentlich sind das die Regionen um Zhangye, einer Stadt im Nordwesten der Provinz Gansu, und um Yanqi, einer Stadt im Uigurischen Autonomen Gebiet Xinjiang. Beide sind eher aride Gebiete mit einem durchschnittlichen Niederschlag von 156 mm/a in Zhangye und 122 mm/a in Yanqi. Im Anhang Kapitel A.4 sind Klimadiagramme der beiden Orte zu finden. Abbildung 13 zeigt eine Karte Chinas, auf welcher Handan, Zhangye und Yanqi markiert sind.



Abbildung 13: Geländekarte Chinas mit den Standorten von Handan, Zhangye, Yanqi und der Hauptstadt Peking [36]

3. Berechnung des Bewässerungsbedarfs

3.1. Ursprüngliches Programm

Das Programm berechnet die benötigte Menge an Bewässerungswasser. Dabei bezieht sich diese Menge auf die gesamte Wachstumsphase dieser Pflanze. Um aussagekräftige Daten zu generieren wird mit meteorologischen Daten von 16 Jahren (1997-2013) gerechnet. Der tägliche Wasserbedarf wird anhand der Gleichung (3) berechnet. Dieser Bedarf, für jeden Tag der Wachstumsphase berechnet, wird aufsummiert. Für die Berechnung werden zusätzliche Daten benötigt, welche über ein Eingabeinterface (Abb. 14) ins MATLAB eingelesen werden.

3.1.1. Verwendete Formel

Zur Berechnung des täglich benötigten Bewässerungswassers wird eine Bilanzrechnung aufgestellt. Diese wird durch den Abbau des Wurzelwassers am Ende jeden Tages dargestellt (Gl. (3), [37]).

$$D_{r,i} = D_{r,i-1} - (P - RO)_i - I_i - CR_i + ET_{c,i} + DP_i \quad (3)$$

$D_{r,i}$	Abbau des Wurzelwassers am Ende des Tages i [mm]
$D_{r,i-1}$	Wassergehalt der Wurzelzone am Ende des Vortages, $i-1$ [mm]
P_i	Niederschlag am Tag i [mm]
RO_i	Oberflächenabfluss am Tag i [mm]
I_i	Netto Bewässerungstiefe am Tag i , welche infiltriert [mm]
CR_i	Steighöhe vom Grundwasser am Tag i [mm]
$ET_{c,i}$	Evapotranspiration der Pflanze am Tag i [mm]
DP_i	Wasserverlust aus der Wurzelzone durch Versickern am Tag i [mm]

Im Folgenden wird auf einige dieser oben genannten Parameter genauer eingegangen.

3.1.1.1. Abbau des Wurzelwassers: $D_{r,i}$

Es zeigt sich, dass solange Wasser im Boden gespeichert werden kann, bis die Feldkapazität erreicht wird. Jegliches Wasser, sei es durch Niederschlag oder Bewässerung, welches die Feldkapazität überschreitet geht noch am selben Tag durch die Wurzelzone verloren. Nimmt man an, dass bei Niederschlag oder Bewässerung der Wassergehalt gleich der Feldkapazität ist, so kann man daraus schliessen, dass der Abbau des Wurzelwassers $D_{r,i}$ Null ist. Durch Versickern des Wassers und durch Evapotranspiration nimmt der Wassergehalt in der Wurzelzone ab. Folgt kein neues Wasser, so wird der Wassergehalt bis zum Welkepunkt abnehmen. Sobald kein Wasser mehr für die Evapotranspiration zur Verfügung steht, wird der Stressfaktor K_s gleich Null, und der Abbau des Wurzelwassers strebt zum maximalen Wert (TAW). Dadurch sind die Grenzen von $D_{r,i}$ [37]:

$$0 \leq D_{r,i} \leq TAW \quad (4)$$

TAW ist das totale verfügbare Wasser im Boden. Dieses Wasser ist die Differenz des Wassergehaltes von Feldkapazität und Welkepunkt (Gl. (5)).

$$TAW = 1000(q_{FC} - q_{WP})Z_r \quad (5)$$

TAW	totales verfügbares Wasser in der Wurzelzone [mm]
q_{FC}	Wassergehalt bei Feldkapazität [m^3/m^3]
q_{WP}	Wassergehalt beim Welkepunkt [m^3/m^3]
Z_r	Wurzeltiefe der Pflanze [m]

3.1.1.2. Steighöhe vom Grundwasser (CR)

Die Menge an Wasser, welches durch die Kapiillarkräfte vom Grundwasserspiegel aufwärts transportiert wird, ist abhängig von Bodentyp, Tiefe des Grundwasserspiegels und Feuchtigkeit der Wurzelzone. Ist der Grundwasserspiegel mehr als 1 m unter der Wurzelzone, kann CR gleich Null gesetzt werden [37].

3.1.1.3. Wasserverlust aus der Wurzelzone durch Versickern (DP)

Ist der Bodenwassergehalt in der Wurzelzone tiefer als die Feldkapazität, so ist der Wasserverlust durch Versickern (DP) gleich Null. Ansonsten kann DP durch die Gleichung (6) berechnet werden. Diese entspricht Gleichung (3) mit Ausnahme, dass $D_{r,i}$ Null ist, da der Wassergehalt die Feldkapazität erreicht hat [37].

$$DP_i = (P_i - RO_i) + I_i - ET_{c,i} - D_{r,i-1} \geq 0 \quad (6)$$

3.1.2. Das Eingabeinterface

Im Eingabeinterface (Abb. 14) werden Koordinaten des Anbauortes, Pflanzenart, Aussaatdatum, Feldkapazität, Welkepunkt und Bodenfeuchte eingegeben. Dabei ist die Feldkapazität die Wassermenge, welche ein zunächst gesättigter Boden gegen die Schwerkraft halten kann [37].

Der Welkepunkt bezeichnet den Wassergehalt des Bodens und zeigt auf, ab welchem Wassergehalt Pflanzen welken [37].

Für die Bodenfeuchte wird ein linearer Ansatz gemacht. So steht bei „very wet“ 100 % des Wassers zu Verfügung, bei „very dry“ 0 % und bei „wet“ bzw. „dry“ 66 % bzw. 33 %. Dies ist rein willkürlich und könnte für genauere Unterteilungen weiter spezifiziert bzw. als direkter Input eingegeben werden.

3.1.3. Output des Programms

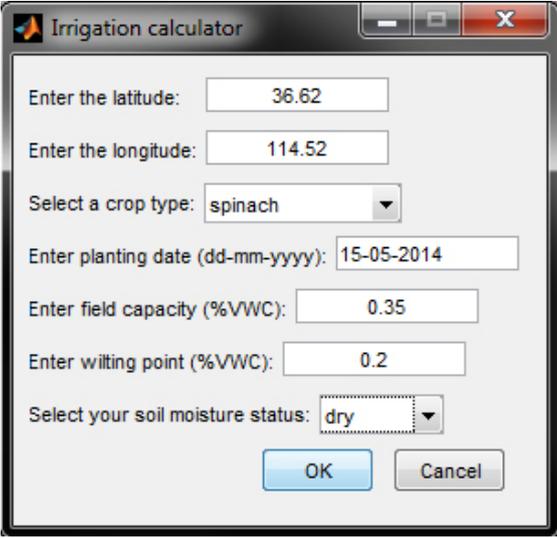
Der Output des Programmes sind zwei Diagramme. Auf dem ersten Diagramm (Abb. 15) wird der kumulierte Bewässerungsbedarf für die ganze Wachstumsphase der Pflanze aufgezeigt. Dabei wird dieser Wasserbedarf für jeden Tag im Jahr berechnet. So kann der Wasserbedarf für jedes Aussaatdatum im Jahr betrachtet werden. Explizit wird der Wasserbedarf für das gewählte, das schlechteste und das optimale Aussaatdatum angegeben.

Das zweite Diagramm (Abb. 16) zeigt für jedes Jahr und deren Mittelwert die Bodenfeuchte über die gesamte Wachstumsphase der Pflanze. Des Weiteren wird die Wasserstressgrenze aufgezeigt. Eine Pflanze ist wassergestresst, wenn die tatsächliche Evapotranspiration geringer ist als die verlangte potentielle Evaporation [38].

3.1.4. Anwendungsbeispiel

Zur Illustration und zum Vergleich mit dem modifizierten Programm (Kapitel 3.2) wird ein Anwendungsbeispiel durchgeführt. Die Eingabedaten sind in der Abbildung 14, die beiden Ausgabegraphiken in Abbildung 15 und 16 dargestellt.

Die Berechnungen ergeben, dass für Spinat, welcher am 15. Mai angesät wird, 62 mm Wasser zum bewässern benötigt wird. Des Weiteren erkennt man in Abbildung 15, dass sich der Wasserbedarf zwischen minimal 29 mm und maximal 79 mm sich bewegt. In Abbildung 16 sollten gegenüber der Abbildung 25 keine Unterschiede erkennbar sein.



The image shows a screenshot of a software window titled "Irrigation calculator". The window contains several input fields and buttons. The inputs are: "Enter the latitude:" with the value "36.62"; "Enter the longitude:" with the value "114.52"; "Select a crop type:" with a dropdown menu showing "spinach"; "Enter planting date (dd-mm-yyyy):" with the value "15-05-2014"; "Enter field capacity (%VWC):" with the value "0.35"; "Enter wilting point (%VWC):" with the value "0.2"; and "Select your soil moisture status:" with a dropdown menu showing "dry". At the bottom of the window are two buttons: "OK" and "Cancel".

Abbildung 14: Eingabeinterface des Programms mit den Eingabedaten für das Anwendungsbeispiel

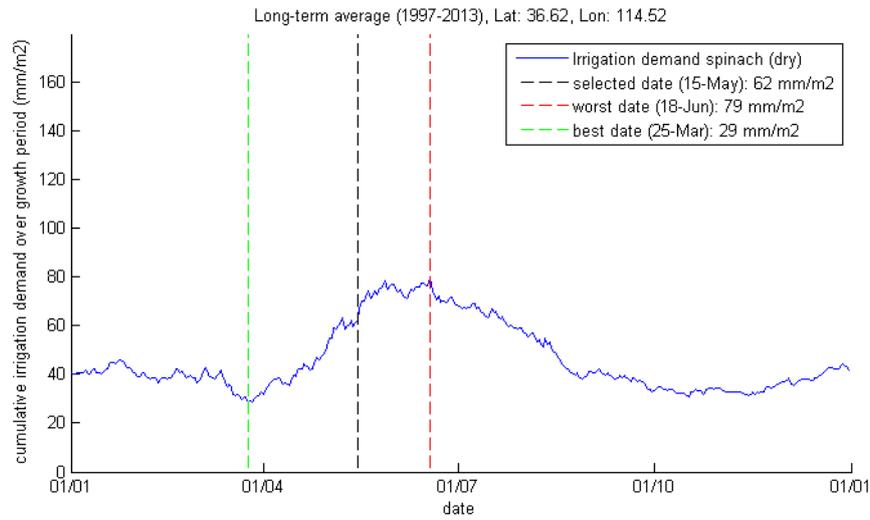


Abbildung 15: Erste Ausgabegraphik ohne Modifikationen

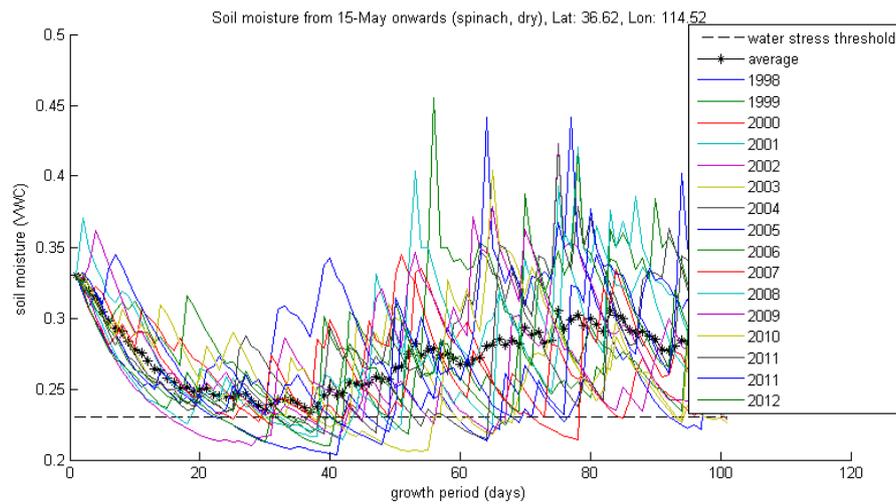


Abbildung 16: Zweite Ausgabegraphik ohne Modifikationen

3.2. Modifikationen

3.2.1. Flussdiagramm Bewässerungsverluste

In Kapitel 3.1 wurde gezeigt, wie das Programm *SoilIrr* den kumulierten Bewässerungsbedarf einer Pflanze berechnet. Um die Wasserreserven sinnvoll zu managen, sollte man jedoch die Wassermenge kennen, welche in den Verteilkanal gegeben werden muss. Das Ziel ist also einen Faktor zu ermitteln, welcher die Verluste bei der Bewässerung zusammenfasst und mit welchem anschliessend der kumulierte Bewässerungsbedarf inklusive Verluste berechnet werden kann. Um Verluste zu lokalisieren wurde ein vereinfachtes Modell der Bewässerung (Abbildung 17) erstellt. Bewässerungswasser wird also in den Verteilkanal eingeleitet, wo es sowohl Versickerungs-, wie auch Verdunstungsverluste gibt. Anschliessend wird das Wasser dem Kanal entnommen und zur Bewässerung verwendet. Dabei verdunstet ein Anteil des Wassers, der andere Teil gelangt in den Boden, wo wiederum ein Anteil versickert. Das restliche Wasser steht der Pflanze zur Verfügung.

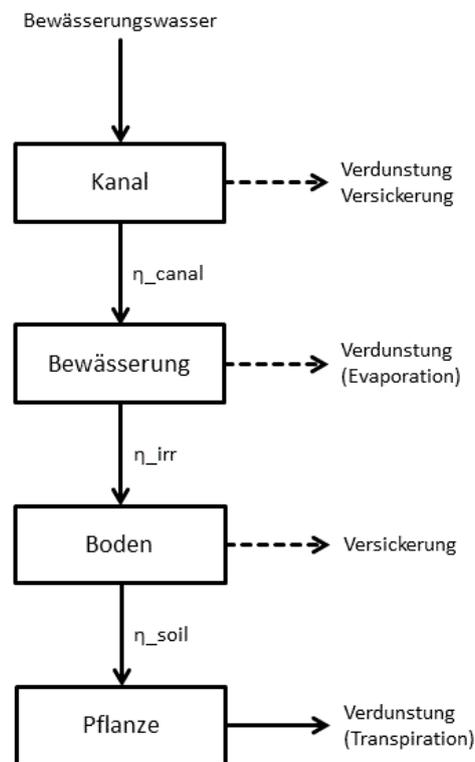


Abbildung 17: Weg des Bewässerungswassers inklusive der Verluste durch Transport, Bewässerung und Versickerung. η_{canal} bezeichnet die Effizienz des Kanals, η_{irr} diese der Bewässerung und η_{soil} bezeichnet welchen Anteil des Wassers im Boden zur Pflanze gelangt.

3.2.2. Verluste durch den Transport zum Feld

Die Effizienz des Verteilkanals kann nach Tabelle 1 [39] bestimmt werden. Diese wurde ausserdem um die Spalte „Rohre“ erweitert. Da die Wasserverluste in einem instand gehaltenen Rohr vernachlässigbar klein sind, wird die Effizienz mit 100 % angenommen. In *IrriDemand* kann nun Kanallänge und Kanalart (Sand, Lehm, Ton, abgedichtet oder Rohr) gewählt werden. Aus diesen beiden Parametern ergibt sich die Effizienz des Kanals, welche im Weiteren mit η_{canal} bezeichnet wird.

Tabelle 1: Effizienz des Verteilkanals nach FAO [39]

Bodentyp Kanallänge	Erdschüttungskanäle			Abgedichtete Kanäle	Rohre
	Sand	Lehm	Ton		
Lang (> 2000 m)	60 %	70 %	80 %	95 %	100 %
Mittel (200-2000 m)	70 %	75 %	85 %	95 %	100 %
Kurz (< 200 m)	80 %	85 %	90 %	95 %	100 %

3.2.3. Verluste durch Bewässerung

Es konnten verschiedene Literaturwerte für die Effizienz der Bewässerung gefunden werden. In Tabelle 2 ist die Effizienz der verschiedenen Bewässerungstypen abgebildet. Für die Implementierung im Programm wurde falls vorhanden der FAO-Wert gewählt. Es konnten jedoch keine Angaben von FAO für Flut- und Unterflurbewässerung gefunden werden. Bei Flutbewässerung wurde deshalb der optimistischste Wert gewählt und bei Unterflurbewässerung wurde die Effizienz mit 95 % angenommen.

Tabelle 2: Vergleich der Effizienz verschiedener Bewässerungstypen [39]

Bewässerungstyp	Literaturwerte	Effizienz	
		FAO	Gewählter Wert
Flutbewässerung	20 – 50 %	-	50 %
Oberflächenbewässerung	50 – 60 %	60 %	60 %
Sprinkler (Beregnung)	50 – 75 %	75 %	75 %
Tröpfchenbewässerung	80 – 90 %	90 %	90 %
Unterflurbewässerung	≥ 95 %	-	95 %

Für die Berechnungen werden nebst der Effizienz auch die prozentualen Verdunstungsverluste der Bewässerung benötigt. Verdunstungs- und Versickerungsverluste sind in Tabelle 3 abgebildet. Da in der Literatur keine Angaben dazu gefunden werden konnten, sind es lediglich Schätzwerte. Aus Tabelle 3 kann η_{irr} und $\eta_{irr,tot}$ ermittelt werden. $\eta_{irr,tot}$ ist die Effizienz und η_{irr} die Effizienz inklusive der Versickerung. Bei der Sprinklerbewässerung beispielsweise wäre $\eta_{irr} = 0.85$ und $\eta_{irr,tot} = 0.75$.

Tabelle 3: Prozentuale Versickerungs- und Verdunstungsverluste bei der Bewässerung.

Bewässerungstyp	Effizienz	Verluste	
		Verdunstung	Versickerung
Flutbewässerung	50 %	25 %	25 %
Oberflächenbewässerung	60 %	20 %	20 %
Sprinkler (Beregnung)	75 %	15 %	10 %
Tröpfchenbewässerung	90 %	5 %	5 %
Unterflurbewässerung	95 %	0 %	5 %

3.2.4. Verluste durch den Salzgehalt

Die Verluste durch die Auswaschung aufgrund des Salzgehaltes werden mit Gleichung (7) [40] berechnet. Das Leaching Requirement (LR) bezeichnet dabei den Anteil des Bewässerungswassers, welcher benötigt wird, um die Salztoleranz der angebauten Pflanze nicht zu überschreiten.

$$LR = \frac{EC_w}{5(EC_e) - EC_w} \quad (7)$$

LR Leaching requirement. Minimale Auswaschanforderung um innerhalb der Salztoleranz der Pflanze zu bleiben. [–]

EC_w Salzgehalt des Bewässerungswassers [dS/m]

EC_e Durchschnittlicher Salzgehalt des Bodens [dS/m]. Dieser Wert kann in einem stationären System als die Salztoleranz der Pflanze angenommen werden.

Falls der Salzgehalt des Feldes vor der Bepflanzung zu hoch ist, kann das Feld solange intensiv ausgewaschen werden, bis der Grenzwert erreicht ist. Die dazu benötigte Wassermenge kann jedoch mit dem Programm nicht berechnet werden. Sobald der Grenzwert erreicht ist, wird die kontinuierliche Auswaschung durch das LR berechnet.

In Tabelle 13 im Anhang A.5 sind die Salztoleranzparameter der im Programm implementierten Pflanzen angegeben. Bei Feldern, welche mit mehr als einer Bepflanzung bewirtschaftet werden, sollte darauf geachtet werden, dass jeweils der tiefste EC_e -Wert gewählt wird. Bei Mais und Winterweizen beispielsweise sollte für EC_e 1.7 dS/m genommen werden.

Wählt man einen höheren EC_e -Wert als der Toleranzwert der Pflanze, wird weniger Wasser für die Auswaschung des Bodens benötigt. Damit erhöht sich jedoch auch der Salzgehalt des Bodens. Aussagen über die Folgen eines zu hohen Salzgehaltes können mithilfe des Faktors b gemacht werden. Dieser Wert sagt aus, um wie viele Prozent der Ertrag pro dS/m über dem Toleranzwert abnimmt.

Bei Wasserknappheit kann auch ein Kompromiss zwischen Ertrag und Wasser für die Auswaschung gefunden werden. Langfristig lohnt es sich jedoch in effizientere Bewässerungsarten oder Kanäle zu investieren. So kann viel mehr Wasser eingespart werden und es gibt zudem keine Ertragseinbussen.

3.2.5. Berechnung der Bewässerungseffizienz

Die Effizienz des Gesamtsystems η_{tot} kann mit Gleichung (8) berechnet werden. η_{canal} und η_{irr} ergeben sich direkt aus Tabelle 1 und Tabelle 3. Für η_{soil} wird der kleinste Wert genommen, welcher sowohl Gleichung (9), wie auch Gleichung (10) erfüllt.

$$\eta_{tot} = \eta_{canal} \cdot \eta_{irr} \cdot \eta_{soil} \quad (8)$$

$$\eta_{soil} \leq 1 - LR \quad (9)$$

$$\eta_{irr} \cdot \eta_{soil} \leq \eta_{irr,tot} \quad (10)$$

Damit kann nun der Bewässerungsbedarf inklusive Verluste wie in Gleichung (11) berechnet werden.

$$Irr_{Cum, Loss} = X \cdot Irr_{cum} = \frac{1}{\eta_{tot}} \cdot Irr_{cum} \quad (11)$$

Im Anhang Kapitel A.6 sind zwei Rechenbeispiele für die Berechnung von η_{tot} .

3.2.6. Anwendungsbeispiel

Wie schon erwähnt, wird in diesem Abschnitt das modifizierte Programm mit dem ursprünglichen Programm verglichen. Es wurden die gleichen Werte wie im Anwendungsbeispiel des ursprünglichen Programms genommen (Abb. 14). Die Werte für die zusätzlichen Eingabeparametern sind in der Tabelle 4 aufgelistet.

Tabelle 4: Die Zusätzlichen Eingabedaten des modifizierten Programms

Eingabeparameter	Wert
Select average length of distribution canal:	200-2000
Select distribution canal type:	loam
Select irrigation form:	subsurface
Enter irrigation water salinity:	1.3
Enter soil salinity tolerance:	2

Das modifizierte Programm gibt weiterhin die 2 Graphiken aus (Im Anhang A.7 Abb. 24 und 25). Des Weiteren wird zusätzlich eine Figur mit Tabellen generiert und ausgegeben (Abb. 18). Darin werden unter *Inputs* alle eingegebenen Daten nochmals ausgegeben, so dass Fehler schneller erkannt werden können. Unter *Water Loss* werden die einzelnen Verluste und der totale Verlust (hier: 36 % des Bewässerungswasser) angezeigt. *Irrigation Water Demand* gibt den Bewässerungswasserbedarf (hier: 98 mm) an, welcher nun inklusive der Verluste benötigt wird. Schlussendlich gibt es noch einen Abschnitt mit *Warnings*. Dort werden Warnungen dargestellt, welche auf Tipfehler und vergessene Eingaben hinweisen sollen.

Betracht man nun den Bewässerungsbedarf von 98 mm und den totalen Verlust von 36 % so müsste der Bewässerungsbedarf ohne Verluste gleich

$$98 \text{ mm} \cdot (1 - 0.36) = 62.7 \text{ mm}$$

sein. Vergleicht man dies mit dem Wert aus Kapitel 3.1.4, welcher 62 mm beträgt, so sieht man, dass die Modifikationen einwandfrei funktionieren.

Inputs	
Latitude	36.6200
Longitude	114.5200
Crop type	spinach
Planting date	15 May 2014
Field capacity [m ³ /m ³]	0.3500
Wilting point [m ³ /m ³]	0.2000
soil moisture status	dry
Distribution canal length [m]	200-2000
Canal type	loam
Irrigation type	subsurface
Irrigation water salinity [dS/m]	1.3000
Soil salinity tolerance [dS/m]	2

Irrigation Water Demand	
Cumulative irrigation demand [mm]	98

Warnings	
no warnings	

Water Loss	
Canal [%]	25
Evaporation from irrigation [%]	0
Infiltration from irrigation (min. LR) [%]	15
Total [%]	36

Abbildung 18: Ausgabetable des Programms

4. Berechnung und Resultate

4.1. Standardeingaben

Für die Berechnungen wurden grösstenteils dieselben Eingaben verwendet. Das vereinfacht den Vergleich zwischen den verschiedenen Resultaten. Diese Eingaben versuchen den Bedingungen zu entsprechen, welche normalerweise in Handan anzutreffen sind. Falls es nicht explizit erwähnt wird, wurden immer diese Eingaben verwendet. In Tabelle 5 sind die Standardeingaben abgebildet. Die Eingaben für Feldkapazität und Welkepunkt sind Annahmen für die in der Region vorherrschenden Böden aus schluffigem Lehm [41] [42]. Die in Tabelle 5 dargestellten Eingaben sind vom Ort und den dortigen Verhältnissen abhängig. Die Salztoleranz und das Datum der Aussaat hängen jedoch von der angebauten Pflanze ab. In Tabelle 6 sind für alle Pflanzen, welche in den weiteren Berechnungen zu finden sind, die Standardeingaben dargestellt. Auch für diese Werte gilt, dass sie verwendet wurden, falls es nicht anders beschrieben wurde.

Tabelle 5: Standarteingaben für die Berechnungen

	Eingabe
Latitude ($^{\circ}N$)	36.5
Longitude ($^{\circ}E$)	114.3
Feldkapazität	0.35
Welkepunkt	0.2
Bodenfeuchte	Trocken
Länge Verteilkanal	200-2000 <i>m</i>
Kanaltyp	Lehm
Bewässerungsart	Unterflur
Salzgehalt Bewässerungswasser	1.3 <i>dS/m</i>

Tabelle 6: Salztoleranz und Datum der Aussaat [43] für verschiedene Pflanzen

Pflanze	Salztoleranz [<i>dS/m</i>]	Datum Aussaat
Mais	1.7	15. Apr
Hirse	6.0	15. Apr
Sorghumhirse	6.8	15. Apr
Baumwolle	7.7	15. Apr
Weizen	6.0	15. Apr
Winterweizen	6.0	15. Okt
Zwiebeln	1.2	25. Okt
Kartoffeln	1.7	25. Apr
Tomaten	2.5	15. Apr
Aubergine	1.7	25. Apr

4.2. Verschiedene Fruchtfolgen

4.2.1. Single Cropping

Unter Single Cropping versteht man den Anbau von nur einer Pflanze pro Jahr. Es wurde für verschiedene Pflanzen der kumulierte Bewässerungsbedarf berechnet. Die Resultate sind in Tabelle 7 dargestellt. Alle Eingaben entsprechen den erwähnten Standarteingaben.

Tabelle 7: Berechnung des kumulierten Bewässerungsbedarfs für verschiedene Pflanzen

Pflanze	Verluste [%]	Bewässerungsbedarf [mm]
Mais	39	71
Hirse	29	63
Sorghumhirse	29	69
Baumwolle	29	95
Weizen	29	66
Winterweizen	29	77
Zwiebeln	46	62
Kartoffeln	39	131
Tomaten	34	87
Aubergine	48	91

4.2.2. Double Cropping

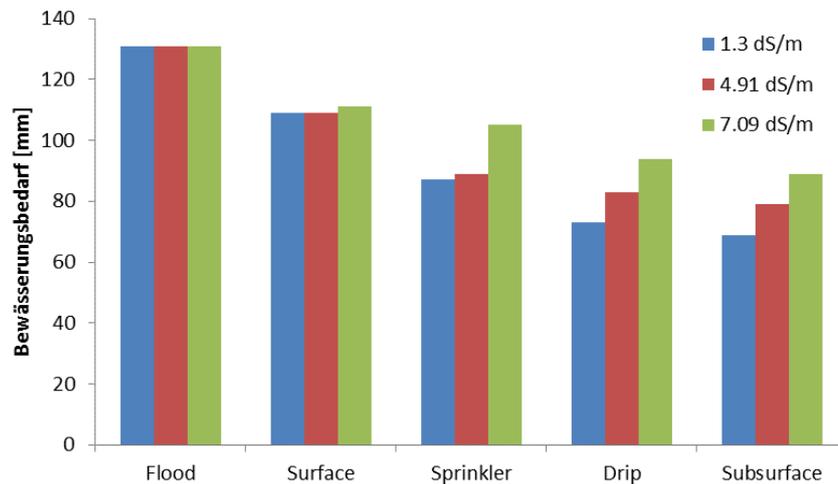
Double Cropping bezeichnet den Anbau von zwei Pflanzen pro Jahr. Der Grund für Double Cropping ist die Steigerung des Ertrags. So lässt sich zweimal im Jahr ernten. Normalerweise wird in Handan im Sommer Mais und Winter Weizen angebaut, es gäbe jedoch auch andere mögliche Fruchtfolgen. Wichtig dabei ist, dass die im Sommer angebaute Pflanze keine zu lange Wachstumszeit aufweist. In Tabelle 8 wurde für mögliche Fruchtfolgen der kumulierte Bewässerungsbedarf berechnet.

Tabelle 8: Der kumulierte Bewässerungsbedarf für verschiedene Fruchtfolgen

Pflanze	Sommer	Winter	Bewässerungsbedarf		
			Sommer [mm]	Winter [mm]	Total [mm]
Mais	Weizen		108	90	198
	Zwiebeln		122	62	184
Sorghum	Weizen		97	77	174
	Zwiebeln		128	62	190
Kartoffeln	Weizen		149	90	239
	Zwiebeln		169	62	231
Tomaten	Weizen		146	83	229
	Zwiebeln		178	62	240

4.3. Einfluss des Salzgehaltes

Der Salzgehalt des Bewässerungswassers kann einen grossen Einfluss auf den kumulierten Bewässerungsbedarf haben. Um den Salzgehalt im Bodens konstant zu halten, sollte der Boden kontinuierlich ausgewaschen werden. Ein gewisser Teil des Bewässerungswassers sollte also versickern oder über Drainagen abgeleitet werden. Je höher dabei der Salzgehalt des Bewässerungswassers, desto höher dessen Anteil, welcher zur Auswaschung benötigt wird. In Abbildung 19 wurde der kumulierte Bewässerungsbedarf von Sorghum für verschiedene Bewässerungsarten berechnet. Die Berechnungen wurden mit Bewässerungswasser aus drei verschiedenen Grundwasserquellen gemacht: einem Frischwasseraquifer (1.3 dS/m), einem durchschnittlich salzhaltigen Aquifer (4.91 dS/m) und einem stark salzhaltigen Aquifer (7.09 dS/m).

**Abbildung 19:** Bewässerungsbedarf für Sorghum mit verschiedenen Bewässerungsarten und verschieden salzhaltigem Bewässerungswasser

In Abbildung 20 wurden die Verluste der Bewässerung verschiedener Bewässerungsarten in Abhängigkeit des Salzgehaltes des Bewässerungswassers aufgetragen. Für den Salzgehalt des Bodens wurde 6.8 dS/m gewählt. Dies entspricht der Salztoleranz von Sorghum. Mit Verluste der Bewässerung ist der Anteil des Wassers gemeint, welcher zwischen Einleitung in den Verteilkanal und Aufnahme der Pflanze verloren geht.

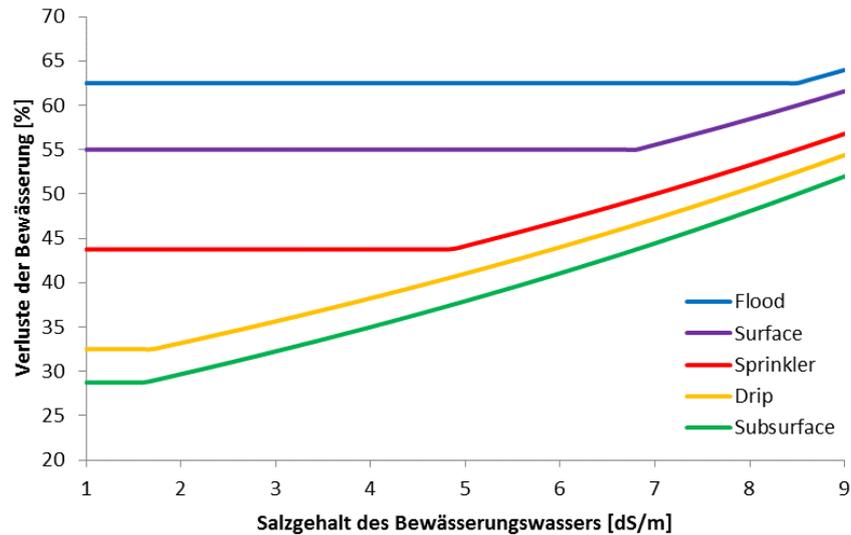


Abbildung 20: Prozentuale Verluste des Bewässerungswassers mit steigendem Salzgehalt des Bewässerungswassers für verschiedene Bewässerungsmethoden. Als Salztoleranz des Bodens wurde 6.8 dS/m (Sorghum) gewählt.

4.4. Einfluss des Ortes

Natürlich haben nicht nur die Bepflanzung des Feldes und der Salzgehalt des Bewässerungswassers einen Einfluss auf den kumulierten Bewässerungsbedarf. Auch örtliche Faktoren wie Niederschlag und Temperatur spielen eine grosse Rolle. Um dies zu untersuchen wurde Handan, Provinz Hebei, mit Zhangye, Provinz Gansu, und Yanqi, Uigurisches Autonomes Gebiet Xinjiang, verglichen. Tabelle 9 zeigt die Eingaben, welche für die verschiedenen Gebiete gemacht wurden. Alle restlichen Eingaben, wie beispielsweise Bewässerung oder Art des Verteilkanales, entsprechen den Standardeingaben. Es wurde angenommen, dass der Bodentyp Zhangyes ähnlich, der von Yanqi jedoch etwas sandiger wie derjenige in Handan ist [44] [45]. Mithilfe dieser Angaben konnte nun der kumulierte Bewässerungsbedarf berechnet werden. Als Datum für die Aussaat wurde bei allen Pflanzen der 15. April gewählt. Die Resultate der Berechnungen sind in Tabelle 10 dargestellt.

Tabelle 9: Angaben für die Berechnungen des kumulierten Bewässerungsbedarfs für die Orte Handan, Zhangye und Yanqi

	Handan	Zhangye	Yanqi
Latitude ($^{\circ}N$)	36.5	38.9	42.1
Longitude ($^{\circ}E$)	115.3	100.5	86.6
Feldkapazität	0.35	0.35	0.25
Welkepunkt	0.2	0.2	0.12
Bodenfeuchte	Trocken	Sehr trocken	Sehr trocken

Tabelle 10: Kumulierter Bewässerungsbedarf verschiedener Feldfrüchte für die Orte Handan, Zhangye und Yanqi

Pflanze	Bewässerungsbedarf		
	Handan [mm]	Zhangye [mm]	Yanqi [mm]
Mais	71	122	118
Weizen	66	88	82
Sorghum	69	119	105
Hirse	63	108	95
Tomaten	87	114	105

4.5. Unterschiedliche Szenarien als wassersparende Massnahmen

In Handan wird vielerorts im Sommer Mais und im Winter Winterweizen angebaut. Meist wird das Bewässerungswasser dabei mittels Erdschüttungskanälen zum Feld gebracht. Da diese Kombination vergleichsweise viel Bewässerungswasser benötigt wurden fünf Szenarios erstellt um Wasser zu sparen.

- Szenario 1: Im Sommer wird anstatt Mais Sorghum angebaut. Sorghum muss weniger stark bewässert werden und ist toleranter gegenüber salzhaltigen Böden.
- Szenario 2: Die Kanäle, welche was Bewässerungswasser zum Feld bringen werden abgedichtet. So gibt es im Verteilkanal keine Verluste durch Versickerung.
- Szenario 3: Anstatt im Sommer Mais und im Winter Winterweizen anzubauen, wird nur noch Mais angebaut. Somit muss nur noch in einer Saison bewässert werden. Ausserdem kann der Mais früher ausgesät werden und wächst deshalb vor allem während den regenreichen Monaten.
- Szenario 4: Zusätzlich zu Szenario 3 werden die Verteilkanäle abgedichtet. Somit gibt es weniger Verluste durch Versickerung.
- Szenario 5: Zusätzlich zu Szenario 3 wird das Bewässerungswasser durch Rohre zum Feld gebracht. Dadurch sollte es kaum Verluste bei der Verteilung des Wassers geben.

Tabelle 11 vergleicht diese fünf Szenarien mit der heutigen Situation. Es wurden jeweils der kumulierte Bewässerungsbedarf und dessen prozentuale Abweichung zur heutigen Situation berechnet. Dabei sind ausser den hier beschriebenen Eingaben immer die Standardeingaben gewählt worden.

Tabelle 11: Kumulierter Bewässerungsbedarf für verschiedene Szenarien verglichen mit der heutigen normalen Situation

	Heute	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	Szenario 4	Szenario 5
Pflanze	Mais	Sorghum	Mais	Mais	Mais	Mais
Datum	15. Jun	15. Jun	15. Jun	15. Apr	15. Apr	15. Apr
Pflanze	Weizen	Weizen	Weizen	-	-	-
Datum	15. Okt	15. Okt	15.Okt	-	-	-
Kanalart	Lehm	Lehm	Abgedichtet	Lehm	Abgedichtet	Rohre
Bewässerung [mm]	198	174	156	71	56	53
Abweichung [%]	0	-12	-21	-64	-72	-73

5. Diskussion der Resultate

5.1. Verschiedene Feldfrüchte und Fruchtfolgen

Bei Betrachtung des kumulierten Bewässerungsbedarfs in Tabelle 7 liegen die meisten Werte zwischen 60 und 95 mm. Es gibt jedoch einen Ausreisser, nämlich die Kartoffel. Mit 131 mm muss sie etwa doppelt so viel bewässert werden wie Hirse. Ein Grund für diesen hohen Bewässerungsbedarf liegt in der Wahl des Datums der Aussaat. In den Berechnungen wurde dieses Datum als den 25. April angenommen, was etwa der Gewohnheit in Hebei entspricht [46]. Abbildung 21 zeigt den kumulierten Bewässerungsbedarf der Kartoffel in Abhängigkeit des Datums der Aussaat.

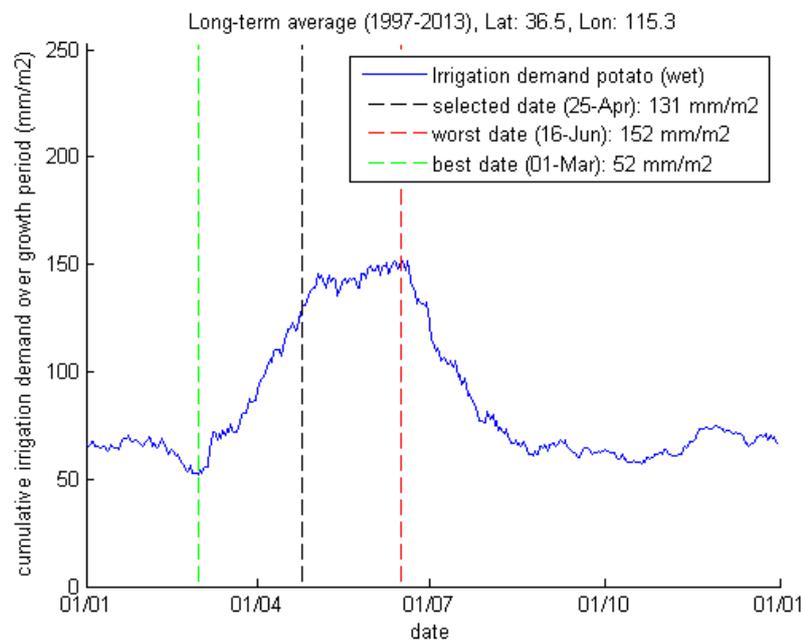


Abbildung 21: Kumulierter Bewässerungsbedarf von Kartoffeln in Abhängigkeit des Datums der Aussaat

Der Bewässerungsbedarf der Kartoffel liegt also zwischen 52 Millimetern am 1. März und 152 Millimetern am 16. Juni, was etwa einem Faktor drei entspricht. Falls man die Kartoffel früher aussähen würde, könnten beachtliche Summen an Bewässerungswasser einspart werden.

Obwohl für alle Pflanzen Verteilkanal und Bewässerungsart dieselben sind, gibt es Unterschiede bei den Verlusten. So wurden Verluste der Bewässerung zwischen 29 % und 48 % berechnet. Der Grund dafür liegt bei der unterschiedlichen Salztoleranz der Pflanzen. Darauf wird aber im Kapitel 5.2 genauer eingegangen.

Bei Betrachtung der Tabelle 8 fällt auf, dass der Anbau von mehr als einer Pflanze deutlich mehr Wasser verbraucht als bei nur einer Pflanze im Jahr. So steigt der kumulierte

Bewässerungsbedarf, welcher mit Mais 71 mm beträgt, auf 198 mm bei Mais und Winterweizen. Das entspricht beinahe einer Verdreifachung. Weiter fällt auf, dass Kartoffeln und Tomaten deutlich mehr Wasser benötigen als Mais und Sorghum. Zwiebeln haben allgemein einen geringeren Bedarf an Bewässerungswasser als Weizen. Da die Nachfrage nach Zwiebeln aber sicherlich weniger gross ist, wäre es kaum sinnvoll der Weizen grossflächig mit Zwiebeln zu ersetzen.

5.2. Einfluss des Salzgehaltes

In Abbildung 19 wird der kumulierte Bewässerungsbedarf von Sorghum in Abhängigkeit der Bewässerungsart und des Salzgehaltes des Bewässerungswassers dargestellt. Wie zu erwarten war, nimmt der Bedarf an Bewässerungswasser mit zunehmender Effizienz der Bewässerung ab. Dieser Effekt ist jedoch bei verschiedenen salzhaltigem Bewässerungswasser unterschiedlich gross. Bei der Flutbewässerung ist der Bewässerungsbedarf noch mit allen Wasserquellen gleich hoch. Schon bei der Oberflächenbewässerung ist dies nicht mehr der Fall. Wenn das am stärksten salzhaltige Bewässerungswasser gewählt wird, so wird etwas mehr Wasser für die Bewässerung benötigt. Ab der Sprinklerbewässerung können Unterschiede für alle drei Wasserquellen festgestellt werden. Dabei wird mit dem Bewässerungswasser, welches den geringsten Salzgehalt aufweist auch stets die geringste Menge an Bewässerungswasser gebraucht.

Sorghum hat eine Salztoleranz von 6.8 dS/m . Um diesen Wert nicht zu überschreiten muss ein Teil des Bewässerungswassers für die Auswaschung des Bodens verwendet werden. Je höher nun der Salzgehalt des Bewässerungswassers, desto höher das Leaching Requirement (LR), also umso mehr Wasser wird für die Auswaschung des Bodens benötigt.

Um den Einfluss des Leaching Requirements auf die Verluste bei der Bewässerung besser zu verstehen wurden in Abbildung 20 die Verluste der Bewässerung in Abhängigkeit von Bewässerungsart und Salzgehalt des Bewässerungswassers abgebildet. Es ist erkennbar, dass bei jeder Bewässerungsform die Verluste am Anfang konstant bleiben. Ab einem gewissen Punkt nehmen die Verluste jedoch zu. Je effizienter die Bewässerungsart, desto geringer der Salzgehalt des Bewässerungswasser um diesen Punkt zu erreichen. Die Erklärung ist einfach. Bei effizienterer Bewässerung versickert weniger Wasser und deshalb übersteigt das Leaching Requirement früher die Versickerungsrate der Bewässerung. Der Knick in der Kurve der Verluste ist demnach der Punkt, bei welchem das Leaching Requirement die Versickerung durch die Bewässerung übersteigt. Ab diesem Punkt steigen die Verluste mit höherem EC_w kontinuierlich an. So lässt sich auch erklären, wieso in Abbildung 19 der Bewässerungsbedarf anfangs unabhängig vom Salzgehalt ist, bei effizienteren Bewässerungsarten jedoch nicht mehr.

Die Differenz des kumulierten Bewässerungsbedarfs von Sorghum zwischen Flut- und Unterflurbewässerung beträgt 62 mm beim Frischwasseraquifer (1.3 dS/m), 52 mm beim salzhaltigen (4.91 dS/m) und 42 mm beim stark salzhaltigen Aquifer (7.09 dS/m). Es lassen sich also rund 20 mm Bewässerungswasser einsparen, wenn das salzarme Bewässerungswasser gewählt wird. Man sollte jedoch bedenken, dass das Frischwasseraquifer auch als Trinkwasser verwendet wird und deshalb einen höheren Wert hat. Aus diesem

Grund wäre es in diesem Fall sinnvoll ein eher salzhaltiges Wasser für die Bewässerung zu nehmen.

5.3. Einfluss des Ortes

Nach Tabelle 10 ist in Handan der Bewässerungsbedarf am geringsten. Er liegt bei den betrachteten Pflanzen durchschnittlich etwa 30 % unter dem von Yanqi und 35 % unter jenem von Zhangye. Dies mag kaum zu überraschen, da in Handan während den Sommermonaten deutlich mehr Niederschlag fällt als in Zhangye oder Yanqi. Erstaunlicher ist aber, dass der Bewässerungsbedarf in Zhangye am höchsten ist, obwohl in Yanqi weniger Niederschlag fällt. Ein Grund dafür könnte der andere Bodentyp oder die etwas höheren Temperaturen Yanqis sein.

5.4. Verschiedene Szenarien als wassersparende Massnahmen

Tabelle 11 zeigt verschiedene Szenarien, welche den Bewässerungsbedarf senken. In Szenario 1 wird im Sommer Mais durch Sorghum ersetzt. Dadurch entsteht eine Ersparnis von Bewässerungswasser um 12 %. Sorghum ist jedoch weniger ertragreich als Mais und die Wasserersparnis ist eher gering. Deutlich besser ist das Szenario 2, bei welchem die Verteilkanäle abgedichtet werden. Dies könnte zum Beispiel durch eine Plastikfolie oder auch durch betonierte Kanäle gemacht werden. Bei den Szenarios drei, vier und fünf wird auf Double Cropping verzichtet und nur noch Mais angebaut. Diese Massnahme hat sogar eine Verringerung des Bewässerungswassers von 64 % mit Lehmkanälen resp. 72 % mit abgedichteten Kanälen resp. 73 % mit Rohren zur Folge. Möglicherweise steigt jedoch der Salzgehalt des Bodens im Winter, da die Felder nicht bepflanzt sind und somit auch nicht bewässert werden. In diesem Fall müssten die Felder vor dem Anbau von Mais intensiv ausgewaschen werden, was die Ersparnis des Bewässerungswassers weniger hoch ausfallen lässt.

Wenn Wasser für die Bewässerung gespart werden muss, aber nicht auf Double Cropping verzichtet werden kann, wäre das Abdichten der Verteilkanäle eine gute Lösung. Ist diese Massnahme nicht ausreichend um Wasser für die Bewässerung nachhaltig zu erhalten, empfiehlt es sich die Felder in den betroffenen Regionen mit nur einer Pflanze zu bewirtschaften.

A. Anhang

A.1. Salzgehalt

Tabelle 12 [29] zeigt die Umrechnungsfaktoren von *ppm* nach *meq/L* für die einzelnen Komponente im Bewässerungswasser. Dazu noch ein kleines Beispiel bei dem 235 ppm

Tabelle 12: Umrechnungsfaktoren für *ppm* und *meq/L*

Bestandteil	<i>ppm</i> \Rightarrow <i>meq/L</i>	<i>meq/L</i> \Rightarrow <i>ppm</i>
Natrium	0.043	23
Kalzium	0.050	20
Magnesium	0.083	12
Chlorid	0.029	35
Sulfat	0.021	48
Karbonat	0.033	30
Bikarbonat	0.016	61

von Magnesium in die Einheit *meq/L* umgerechnet wird:

$$0.083 \times 235 \text{ ppm} = 19.5 \text{ meq/L}$$

A.2. Umrechnung der elektrischen Leitfähigkeit

Möchte man die elektrische Leitfähigkeit in total gelöstem Salz (TDS) oder umgekehrt darstellen so gelten folgende Gleichungen ((12), (13) und (14)) [29]:

$$TDS \text{ (ppm)} = 640 \times EC \text{ (dS/m)} \quad (12)$$

$$TDS \text{ (meq/l)} = 10 \times EC \text{ (dS/m)} \quad (13)$$

$$TDS \text{ (ppm)} = 800 \times EC \text{ (dS/m)} \quad (14)$$

Dabei ist zu beachten, dass die Gleichungen ((12) und (13)) für eine elektrische Leitfähigkeit von weniger als 5 *dS/m* gelten, Gleichung (14) für eine die grösser als 5 *dS/m* ist. Diese Gleichungen ((12), (13) und (14)) sind Mittelwerte. So können bei unterschiedlichen Salzkompositionen unterschiedliche Faktoren entstehen. Deshalb sollten diese Gleichungen ((12), (13) und (14)) mit Vorsicht benutzt werden [29].

A.3. Rechenbeispiel zum Einfluss des Salzes auf den Ertrag

Berechnet wird die Abnahme des Ertrags von Mais durch eine Erhöhung des Salzgehaltes im Bewässerungswassers. Dies wird anhand der Gleichung (2) und den Werten aus der Tabelle 13 berechnet. Betrachtet werden fiktive Salzkonzentrationen von 2, 4, 6 und 8 dS/m .

Für $EC_e = 2 dS/m$:

$$Y = 100 - b(EC_e - a) = 100 - 12(2 - 1.7) = 96.4 \%$$

Für $EC_e = 4 dS/m$:

$$Y = 100 - b(EC_e - a) = 100 - 12(4 - 1.7) = 72.4 \%$$

Für $EC_e = 6 dS/m$:

$$Y = 100 - b(EC_e - a) = 100 - 12(6 - 1.7) = 48.4 \%$$

Für $EC_e = 8 dS/m$:

$$Y = 100 - b(EC_e - a) = 100 - 12(8 - 1.7) = 24.4 \%$$

A.4. Klimadiagramme von Yanqi und Zhangye

Abbildung 22 zeigt den monatlichen Niederschlag und die durchschnittlichen monatlichen Tageshöchst- und Tiefsttemperaturen von Zhangye, Abbildung 23 jene von Yanqi.

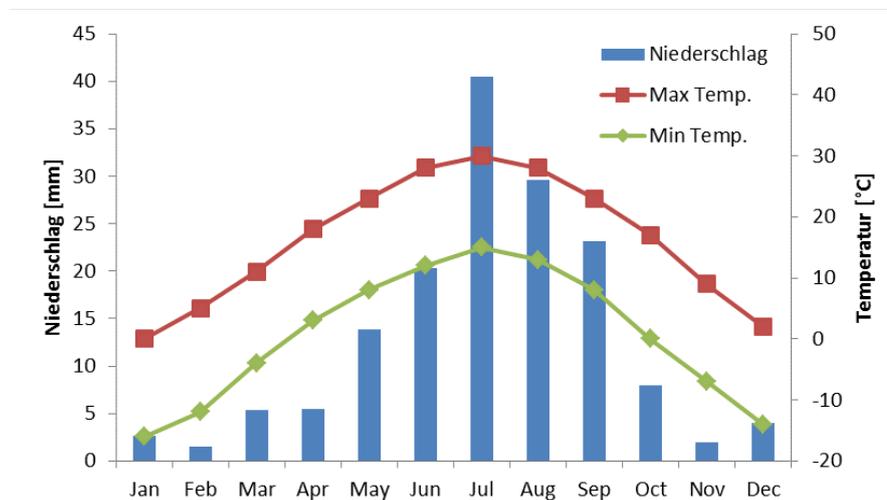


Abbildung 22: Monatlicher Niederschlag und durchschnittliche monatliche Temperatur von Zhangye

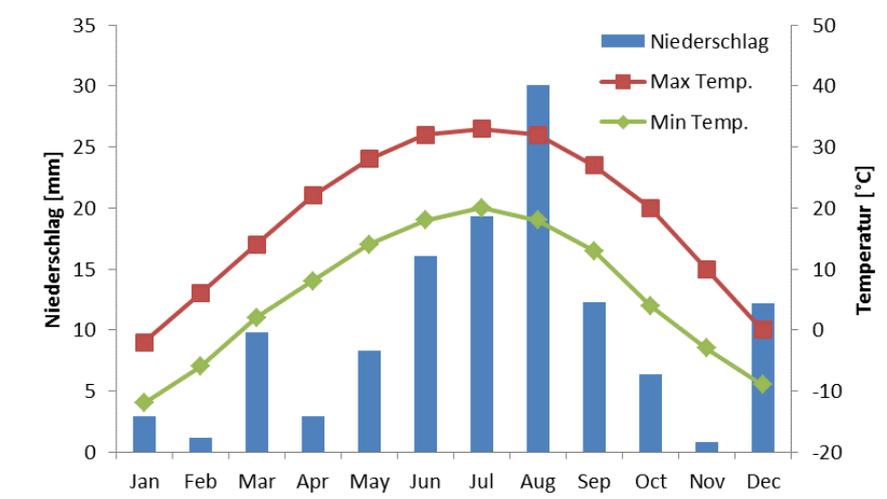


Abbildung 23: Monatlicher Niederschlag und durchschnittliche monatliche Temperatur von Yanqi

A.5. Salztoleranzparameter

Tabelle 13 zeigt die Salztoleranzparameter der im Programm implementierten Pflanzen [47]. Angaben zu vielen weiteren Pflanzen sind in der Publikation „Agricultural Drainage Water Management in Arid and Semi-Arid Areas“ von FAO (2003) zu finden.

Tabelle 13: Die im Programm implementierten Pflanzen mit ihren Salztoleranzparametern.

*Grobe Einschätzung der Salztoleranz; S = Sensitiv; MS = Mässig sensitiv; MT = Mässig tolerant; T = Tolerant

**Für diese Pflanzen konnten keine Werte gefunden werden

Pflanze	Salztoleranzparameter		Rating*
	Toleranz (EC_e) [dS/m]	Abnahme Ertrag (b) [% pro dS/m]	
Aubergine	1.1	6.9	MS
Baumwolle	7.7	5.2	T
Bohnen	1.0	19.0	S
Cassava	-	-	MS
Hirse	-	-	T
Kartoffel	1.7	12.0	MS
Kohl	1.8	9.7	MS
Linsen**	-	-	-
Mais	1.7	12.0	MS
Reis	1.9	9.1	MS
Sisal**	-	-	-
Sorghumhirsen	6.8	16.0	MT
Spinat	2.0	7.6	MS
Tomaten	2.5	9.9	MS
Weizen	6.0	7.1	MT
Zwiebeln	1.2	16.0	S

A.6. Rechenbeispiel zur Berechnung der Effizienz

A.6.1. Beispiel 1

Ein Landwirt baut Mais an. Die Verteilkanäle sind aus lehmiger Erde und haben eine durchschnittliche Länge von 1500 Metern. Bewässert wird mit Oberflächenbewässerung. Das Bewässerungswasser stammt aus einem Frischwasseraquifer mit einem Salzgehalt von 1.3 dS/m . Nach Tabelle 1 und Tabelle 3 gilt $\eta_{canal} = 0.75$, $\eta_{irr} = 0.8$ und $\eta_{irr,tot} = 0.6$. Nach Tabelle 13 beträgt die Salztoleranz von Mais 1.7 dS/m . Somit lässt sich das Leaching Requirement mit Gleichung (7) berechnen.

$$LR = \frac{1.3 \text{ dS/m}}{5 \cdot 1.7 \text{ dS/m} - 1.3 \text{ dS/m}} = 0.18$$

Nun können die Bedingungen für η_{soil} aufgestellt werden.

$$\eta_{soil} \leq 1 - LR = 1 - 0.18$$

$$\eta_{soil} \leq 0.82$$

$$\eta_{irr} \cdot \eta_{soil} \leq \eta_{irr,tot}$$

$$\eta_{soil} \leq \frac{\eta_{irr,tot}}{\eta_{irr}} = \frac{0.6}{0.8}$$

$$\eta_{soil} \leq 0.75$$

Um die beiden Bedingungen zu Erfüllen, muss $\eta_{soil} = 0.75$ sein. Somit ergibt sich für die Gesamteffizienz:

$$\eta_{tot} = 0.75 \cdot 0.8 \cdot 0.75 = 0.45$$

Das heisst, dass lediglich 45 % des ursprünglich in den Verteilkanal eingeleiteten Bewässerungswassers die Pflanze erreicht. Die Verluste betragen somit 55 %!

A.6.2. Beispiel 2

Der Landwirt aus Beispiel 1 investiert nun in seine Kanäle und Bewässerung. So sind die Kanäle nun Abgedichtet und bewässert wird neu mit Unterflurbewässerung. Wie ändert sich somit die Effizienz?

Die Effizienz für Abgedichtete Kanäle beträgt 0.95 , $\eta_{irr} = 1$ und $\eta_{irr,tot} = 0.95$. Am Leaching Requirement hat sich gegenüber Beispiel 1 nichts geändert. Es gilt weiterhin $LR = 0.18$. Somit lassen sich erneut die Bedingungen für die Effizienz des Bodens aufstellen.

$$\eta_{soil} \leq 1 - LR$$

$$\eta_{soil} \leq 0.82$$

$$\eta_{soil} \leq \frac{\eta_{irr,tot}}{\eta_{irr}} = \frac{0.95}{1}$$

$$\eta_{soil} \leq 0.95$$

In diesem Beispiel ist nun nicht mehr die Bewässerungsart entscheidend für die Verluste im Boden sondern das Leaching Requirement. Um beide Ungleichungen zu erfüllen gilt $\eta_{irr} = 0.82$. Die Gesamteffizienz beträgt demnach:

$$\eta_{tot} = 0.95 \cdot 1 \cdot 0.82 = 0.78$$

Das System ist also gegenüber Beispiel 1 viel effizienter geworden. Die Verluste betragen nur noch 22% . Mit der Abdichtung des Verteilkanals und der neuen Bewässerungsart konnten die Verluste also von 55% auf 22% reduziert werden und somit viel Bewässerungswasser gespart werden.

A.7. Ausgabebilder des modifizierten Programms

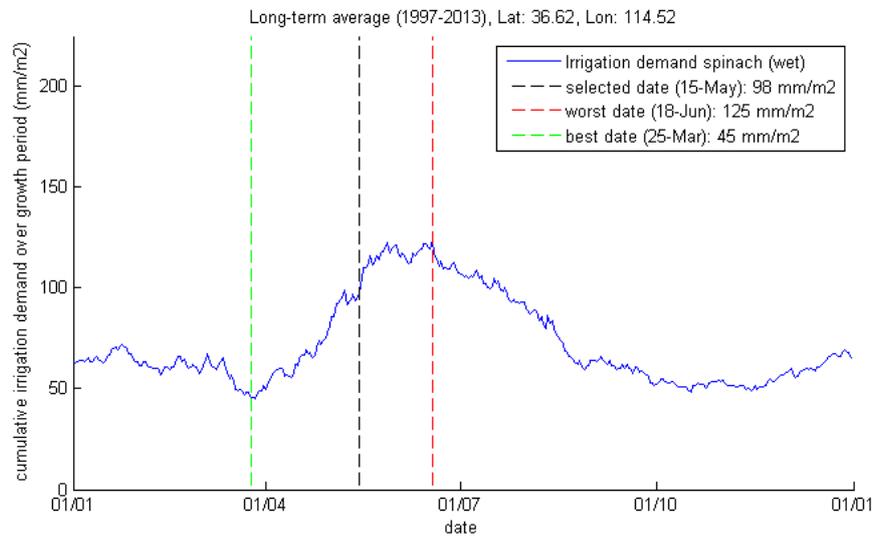


Abbildung 24: Erste Ausgabegraphik mit Modifikationen

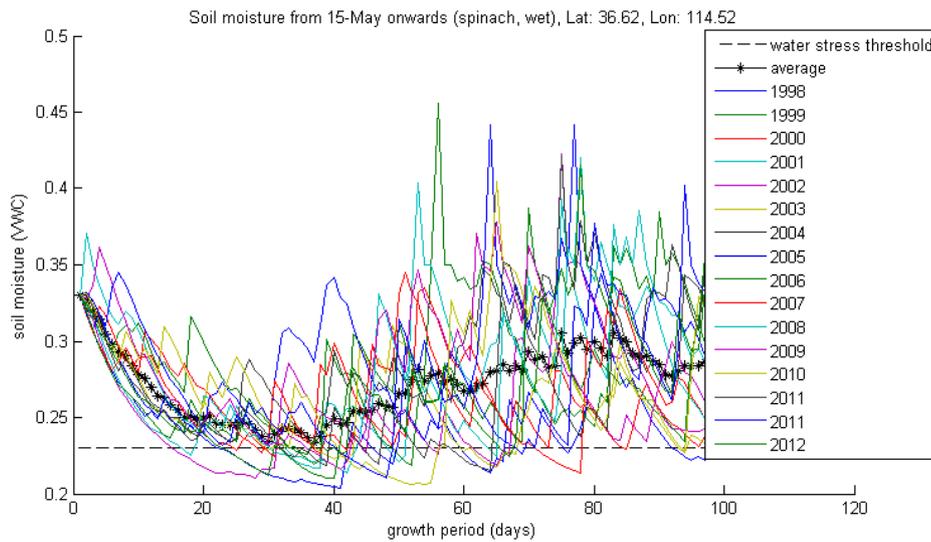


Abbildung 25: Zweite Ausgabegraphik mit Modifikationen

B. Literaturverzeichnis

- [1] World Water Assessment Programme. 2009. The United Nations World Water Development Report 3: Water in a Changing World. Paris: UNESCO, and London:Earthscan.
- [2] <http://www.water-for-africa.org/de/glossar.html> (02.06.2014)
- [3] Kasang, Dieter, Wasserverfügbarkeit und Klimawandel
<http://bildungsserver.hamburg.de/wasserressourcen-nav/2182300/wasserverfuegbarkeit-klimawandel.html> (02.06.2014)
- [4] Menzel, L.; Flörke, M.; Matovelle, A.; Alcamo, J (2007): Impact of socio-economic development and climate change on water resources and water stress, In: Proc. 1st International Conference on Adaptive and Integrative Water Management (CAIWA 2007), Basel
- [5] <http://bildungsserver.hamburg.de/wasserressourcen-nav/2182180/wassernutzung.html> (02.06.2014)
- [6] Groundwater recharge from irrigated cropland in the North China Plain: case study of Luancheng County, Hebei Province, 1949–2000
- [7] Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56, Chapter 1, 1998
- [8] <http://www.spektrum.de/lexikon/biologie-kompakt/transpiration/11996> (20.05.2014)
- [9] <http://water.usgs.gov/edu/watercycletranspiration.html> (05.05.2014)
- [10] <http://www.geodz.com/deu/d/Lysimeter> (18.05.2014)
- [11] <http://www.fao.org>
- [12] Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56, Chapter 6, 1998
- [13] http://www.allianceforwaterefficiency.org/Flood_Irrigation_Introduction.aspx (03.06.2014)
- [14] <http://www.allianceforwaterefficiency.org/1Column.aspx?id=1778&LangType=1033&terms=flood> (02.06.2014)
- [15] <https://blog.explore2gether.de>
- [16] FAO: Guidelines for designing and evaluating surface irrigation systems, Surface irrigation systems, 1989

-
- [17] FAO: Irrigation Water Management: Irrigation Scheduling, Annex I: Irrigation efficiencies, 1989
- [18] <http://luirig.altervista.org>
- [19] Melby, Peter, Simplified irrigation design, ISBN: 0-442-01822-3
- [20] FAO: Irrigation Water Management: Irrigation Methods, Chapter 5, 1985-1990
- [21] <http://www.uk2sitebuilder.com>
- [22] FAO: Irrigation Water Management: Irrigation Methods, Chapter 6, 1985-1990
- [23] <http://nationalgeographic.com>
- [24] Drip-irrigation systems for small conventional vegetable farms and organic vegetable farms, 2008
- [25] Subsurface Drip Irrigation (SDI), Fact Sheet No. 4.716, 2009
- [26] Advantages and Disadvantages of Subsurface Drip Irrigation
- [27] <http://www.osmo-drain.de>
- [28] Studer, Christoph, HAFL, Advantages and Disadvantages of Subsurface Drip Irrigation, 27.11.2012, KKL Luzern
- [29] Agricultural salinity and drainage, Kapitel 2, 2006
- [30] Agricultural salinity and drainage, Kapitel 3, 2006
- [31] <http://atimes.com/atimes/0thers/hebei.html> (17.05.2014)
- [32] <http://atimes.com>
- [33] worldweatheronline.com
- [34] Effects of saline water irrigation on soil salinity and yield of winter wheat–maize in North China Plain, 2007
- [35] Groundwater recharge from irrigated cropland in the North China Plain: case study of Luancheng County, Hebei Province, 2004
- [36] Google Maps
- [37] Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56, Chapter 8, 1998
- [38] <http://blogs.ethz.ch/klimablog-archive/klimawissen/glossar> (03.06.2014)

- [39] FAO, Irrigation Water Management: Irrigation Scheduling, Table 7, 1989
- [40] Water quality for agriculture, 2. Salinity Problems, 1994
- [41] Groundwater Recharge at Five Representative Sites in the Hebei Plain, China, 2009
- [42] Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56, 1998
- [43] Estimation of irrigation requirement for sustainable water resources reallocation in North China, 2010
- [44] Landscape change and sandy desertification in arid areas: a case study in the Zhangye Region of Gansu Province, China, 2005
- [45] Regionalization for soil texture in Yanqi Basin of Xinjiang, China
- [46] Estimation of irrigation requirement for sustainable water resources in North China, 2010
- [47] FAO; Agricultural Drainage Water Management in Arid and Semi-Arid Areas; 2003