

Schadenspotentiale und Schäden in der Landwirtschaft durch Überflutungsereignisse mit Salzwasser

Jörg Fortmann und Christian Grimm

Zusammenfassung

Überflutungen infolge des Versagens einer Küstenschutzanlage infolge von Sturmfluten können aufgrund der küstentypischen Randbedingungen andere Schäden hervorrufen als Hochwässer im Binnenland. Hierzu zählen insbesondere die Auswirkungen des Mediums Salzwasser auf die zu erwartenden Schäden, die charakteristischen Formen der Topografie und auch die typischen Formen der Landnutzung in den Küstenbereichen. In diesem Beitrag wird eine Methode zur Bewertung von Schadenspotentialen und Schäden in Bezug auf die Auswirkungen von Salzwasser auf landwirtschaftliche Nutzflächen sowie eine praxisnahe Anwendung der entwickelten Methode für die Projektgebiete Norden und Pellworm vorgestellt.

Schlagwörter

Salzwassereinfluss, landwirtschaftlicher Schaden, Schadenspotential, Pellworm, Norden

Summary

A flood event due to the failure of a coastal defense system has a different damage outcome than riverine flood event due to the coastal typical conditions. These include in particular the impact of the medium salt water to the anticipated damage, the characteristic of the topography and the typical forms of land use in coastal areas as well. This paper presents a method for assessing potential damage and damages related to the effects of salt water on agricultural areas and a practical application of the developed method for the project areas Norden and Pellworm.

Keywords

salt water, agricultural land use, damage, Pellworm, Norden

Inhalt

1	Einleitung	7
2	Art der Schäden bei Pflanzen und Böden durch den Überstau mit Salzwasser	8
2.1	Schädigung der Pflanzen	8
2.2	Schadssymptome bei Pflanzen durch Versalzung	8
2.3	Ursachen von Salzs Schäden bei Pflanzen	8

2.4	Merkmale der Salztoleranz bei Pflanzen.....	9
2.5	Schädigung der Böden durch Salzwasser	10
3	Kriterien für das Ausmaß der Schädigung landwirtschaftlicher Kulturen durch den Überstau mit Salzwasser.....	11
3.1	Salzgehalte, Salzfrachten, Salzeindringtiefen, Überstaudauer	11
3.2	Salzgehalte im Meerwasser und Zusammensetzung des Salzes.....	11
3.3	Salzgehalte im Überflutungswasser	12
3.4	Salzgehalte im Bodenwasser	12
3.5	Salzfrachten	13
3.6	Salzeindringtiefen	14
3.7	Überstaudauer	14
3.8	Elektrische Leitfähigkeit im Wasser und in der Bodenlösung.....	14
3.9	Natrium-Adsorptionswert (SAR).....	16
3.10	Kulturartenspezifische Salztoleranz von Feldfrüchten	17
3.11	Austauschhäufigkeit des Bodenprofils.....	19
3.12	Gesamtdarstellung der Einflussgrößen auf Ertragsverluste durch Salzwasserüberstau	20
4	Vorgehensweise zur Ermittlung potentieller Schäden auf landwirtschaftlichen Flächen	21
4.1	Methode	21
4.2	Projektgebiet Norden.....	22
4.3	Projektgebiet Pellworm	27
4.4	Szenario-Annahmen für die Überflutung landwirtschaftlicher Flächen mit Salzwasser	29
4.4.1	Szenario 1: Ertraglicher Totalausfall im ersten Jahr.....	33
4.4.2	Szenario 2: Ertraglicher Totalausfall im ersten Jahr sowie Teilausfall im Folgejahr auf den undurchlässigeren Standorten.....	34
4.5	Projektgebiet Norden: Marschstandorte/Ertragsklasse „hoch“	34
4.5.1	Szenario 1	34
4.5.2	Szenario 2	35
4.6	Projektgebiet Norden: Geeststandorte/Ertragsklasse „niedrig“	36
5	Gesamtdarstellung der Schadenspotentiale in den Projektgebieten	37
5.1	Schadenspotentiale im Projektgebiet Norden	37
5.2	Schadenspotentiale im Projektgebiet Pellworm	39
6	Fazit	40
7	Schriftenverzeichnis	42

1 Einleitung

Nach Voigt (1964) wurden durch die Sturmflut am 16./17.02.1962 in den Bundesländern Niedersachsen, Hamburg sowie Bremen 57.000 ha überflutet. Allein in Niedersachsen sind im Deichhinterland ~34.000 ha landwirtschaftliche Nutzfläche von den Überschwemmungen betroffen gewesen (NMELF 1962). Dreieinhalb Wochen nach der Sturmflut war am 10.03.1962 von 530 km² Überschwemmungsfläche in Niedersachsen noch eine Fläche von 160 km² überflutet (Hannoversche Land- und Forstwirtschaftliche Zeitung 1962a).

Im Landwirtschaftsblatt Weser-Ems (1962a) wird berichtet, dass das Abfließen des Wassers durch zerstörte Schöpfwerke und verschlammte Siele behindert wird. In den überfluteten Gebieten wurden die Wintersaaten zerstört bzw. stark geschädigt.

Die Hannoversche Land- und Forstwirtschaftliche Zeitung (1962b) berichtet von 46.000 dt nässegeschädigter Äpfel in den Lagern im Obstanbauggebiet des Alten Landes bei Hamburg infolge der Sturmflut 1962. Hinsichtlich der Abschätzung von Schäden in der Landwirtschaft durch Überflutungen werden unterschiedliche Angaben gemacht. Die Hannoversche Land- und Forstwirtschaftliche Zeitung (1962b) zitiert Beobachtungen, nach denen die Überschwemmungen mit Nordseewasser in Holland im Jahr 1953 zu siebenjährigen Ertragsrückgängen geführt hätten. Allerdings waren die Salzgehalte des Überschwemmungswassers nach der Sturmflut 1962 in weiten Bereichen nur minimal, sodass von einer geringeren Schädigung ausgegangen werden könnte. Im Landwirtschaftsblatt Weser-Ems (1962b) wird dargestellt, dass bei länger als drei Tage währendem Salzwasserüberstau Wintersaaten verdorben, bei kürzer andauerndem Überstau dagegen keine Schädigungen zu erwarten seien. Insgesamt seien auf Salz belasteten Ackerflächen mit dreijährigen Ertragsrückgängen zu rechnen. Auf Grünland seien bei winterlichem Überstau mit salzhaltigem Wasser keine größeren Schäden zu erwarten (Hannoversche Land- und Forstwirtschaftliche Zeitung 1962c). Auch hinsichtlich länger andauernder Überschwemmungen mit Süßwasser scheint das Grünland eine relativ hohe Regenerationsfähigkeit aufzuweisen: Während nach der Überflutung der Geeste-Niederung (Bereich Bremerhaven-Kührstedt) durch Hochwasser nach Deichbruch im Winter 1953/54 eine Fläche von ~4.000 ha für einen Zeitraum von acht bis zehn Wochen von einer Eisdicke überdeckt war und die Grasnarbe des betroffenen Grünlandes vernichtet erschien, hatte sich die Grasnarbe im Sommer 1954 annähernd wieder erholt. Ein weiteres Beispiel stellen die im Jahr 1956 über vier bis sieben Wochen andauernden sommerlichen Überschwemmungen in den Flussniederungen der Aller-Weser-Leine-Region dar, die mit der „völligen Vernichtung des oberirdischen Gräserbestandes“ einhergingen. Vier Wochen nach Abfließen des Wassers zeigte sich der Gräserbestand als weitestgehend wieder regeneriert (Hannoversche Land- und Forstwirtschaftliche Zeitung 1962c). In der Hannoverschen Land- und Forstwirtschaftlichen Zeitung (1962c) wird darauf hingewiesen, dass das Ausmaß der Schädigungen infolge eines Überstaus mit Süßwasser besonders vom Eintrittszeitpunkt beeinflusst wird: Schwerste Schäden sind generell bei sommerlichen Überflutungen während der aktivsten Vegetationsperiode zu verzeichnen, da sich während dieser Zeit die Pflanzen im vollen Wachstum befinden und das Wurzelsystem den höchsten Sauerstoffbedarf zeigt. Dagegen sind bei winterlichen Überflutungen zur Zeit der Wachstumsruhe – auch bei mehrwöchigem Überstau – keine nennenswerten Schäden zu erwarten. Das Ausmaß der Schädigung landwirtschaftlicher Flächen durch Sedimen-

tationsvorgänge infolge der Sturmflut 1962 wird von Voigt (1964) lediglich als gering bewertet und sei nur von begrenzt lokaler Bedeutung.

2 Art der Schäden bei Pflanzen und Böden durch den Überstau mit Salzwasser

2.1 Schädigung der Pflanzen

Schon bei Süßwasser können auf landwirtschaftlich genutzten Flächen (Acker- sowie Grünland) an den angebauten Kulturen durch einströmende oder überflutende Wässer Primärschäden auftreten, die das Pflanzenwachstum unmittelbar negativ beeinflussen (Klaghofer 2003):

- Bei höheren Fließgeschwindigkeiten können Feldfrüchte geknickt, abgebrochen oder herausgerissen werden.
- Durch Sedimentation von Schwebstoffen oder Ablage von Geschiebe werden Früchte sowie Gräser überdeckt.
- Schwebstoffe können höhere Konzentrationen an Schwermetallen, Pestiziden und organischen Verbindungen aufweisen, die zur Kontamination von Pflanzen sowie Böden führen können.
- Durch Wasserüberstau wird infolge des Sauerstoffmangels das Pflanzenwachstum geschädigt.

2.2 Schadsymptome bei Pflanzen durch Versalzung

Neben den durch Süßwasser an Pflanzen hervorgerufenen Primärschäden treten durch den Überstau mit Salzwasser zusätzliche Schädigungen an Pflanzen hinzu. Salzschäden an Pflanzen können nach Zeng et al. (2002) und Finck (1975) sich äußern in:

- Keim- und Auflaufschäden,
- Wachstumsverschlechterungen mit Schadsymptomen (Welketracht, Chlorosen, Nekrosen),
- Beschädigung der Meristeme in wachsenden Sprossen,
- Reduktion der Ertragskomponenten (Ertragsdepressionen),
- Beeinträchtigung der Qualität der Ernteprodukte und
- reduzierte Resistenz gegenüber Schadorganismen.

2.3 Ursachen von Salzschäden bei Pflanzen

Im Einzelnen beruhen nach Finck (1975) und Robinson et al. (1997) die genannten Schadsymptome auf

- Plasmolyse (Schrumpfung des Protoplasten),
- Behinderung des Zellwachstums und der Zellteilung,
- Störung der Stomataschließzellen (Erhöhung der Transpiration),
- Störung des Stoffwechsels durch Ionen-Imbalancen (antagonistische Behinderung der Aufnahme und des Transportes von Nährionen, besonders durch Na^+),

- Anhäufung freier z. T. toxischer Aminosäuren, Ammoniak sowie toxischer Diamine,
- verringerte Mobilisation von Zucker und Stärke während der Keimung.

Die Ursachen liegen nach Finck (1975) und Keskin (2005) einerseits in der allgemeinen osmotischen Salzwirkung und andererseits in der spezifischen toxischen Ionenwirkung. Der osmotische Effekt bewirkt einen physiologischen Wassermangel. Erhöhte Salzgehalte in der Bodenlösung erschweren den Pflanzenwuchs, da sie das osmotische Potential des Bodenwassers erhöhen und so die Wasseraufnahme erschweren (Scheffer und Schachtschabel 1989). Nach Finck (1975) strömt das Wasser im Extremfall entlang eines Saugspannungsgradienten aus der (salzärmeren) Pflanze in die (salzreichere) Rhizosphäre zurück. Der Turgor sinkt, der permanente Welkepunkt wird überschritten, die Pflanze stirbt ab (Plasmolyse, Schädigung der Eiweißstruktur). Dagegen beruht die spezifische toxische Ionenwirkung darauf, dass für jedes (Nähr-)Element unterschiedliche Grenzwerte existieren für

- den Bereich akuten (bzw. latenten) Mangels,
- den optimalen Versorgungsbereich,
- den Zustand des Luxuskonsums sowie für
- den Bereich der akuten (bzw. latenten) Toxizität.

Das Überschreiten der kulturarten- und stadienspezifischen Grenzwerte führt im Bereich der Toxizität zu Schadsymptomen, die vom jeweiligen Element (z. B. Na, B, Cl) abhängig sind.

Eine spezifische Salzttoxizität liegt vor, wenn Wachstumsdepressionen stärker ausfallen, als es die osmotischen Verhältnisse in der Bodenlösung erwarten lassen würden (Schleiff 1977). Allgemein äußern sich Salzschäden durch Überschüsse und/oder Mangel einzelner Ionen. Als Beispiele seien die Ionenkonkurrenzen zwischen Na^+ und K^+ sowie Ca^{2+} genannt, bei denen durch eine verstärkte Na-Aufnahme K- bzw. Ca-Mangel induziert wird. Ein weiteres Beispiel wäre das Erreichen toxischer Na^+ , Cl^- , B^{3+} -Konzentrationen in der Pflanze durch Salzüberschuss in der Bodenlösung.

Zu beachten ist, dass die Salztoleranz von Pflanzen nichts Statisches darstellt. So führt z. B. eine optimale Versorgung mit Kalium zu einer Erhöhung der Salztoleranz gegenüber Natrium (Schleiff 1974a, 1974b). Zudem kann die Salztoleranz in Abhängigkeit vom Vegetationsstadium stark schwanken.

2.4 Merkmale der Salztoleranz bei Pflanzen

Im Gegensatz zu den Glykophyten zuzuordnenden Kulturpflanzen zeichnen sich Halophyten (= Salzpflanzen wie Queller, Andelgräser, Strand-Aster etc.) durch die Fähigkeit zur aktiven Salzregulation sowie durch passive Salztoleranz aus. Nach Koyro (1998) wachsen Glykophyten bei NaCl-Konzentrationen im Wasser von 0-0.7 %. Die Halophyten können dagegen NaCl-Gehalte von bis zu 6.5 % im Wasser tolerieren.

Der Schutz erfolgt nach Munns et al. (2002), Läubli und Lüttge (2002), Pessarakli (1999) sowie Staples und Toenniessen (1984) durch:

- Selektive Ionenaufnahme (Ausschluss oder auch Verhinderung des Eindringens unerwünschter Ionen in wachsendes sowie physiologisch aktives Gewebe z. B. durch veränderte Zusammensetzung der Zellmembran im Fettsäuremuster),

- Reduktion der Transpiration durch Stomataregulation,
- Ausscheidung (über Blatt mittels Absatz-, Blasenhaare, Absatzdrüsen und über die Wurzel),
- Abwurf von Pflanzenteilen,
- Sukkulenz (Verdünnung durch erhöhte Wasseraufnahme),
- Abschluss des Vegetationszyklus vor Erreichen letaler Salzkonzentrationen,
- Ablagerung in Zellkompartimenten wie z. B. in Vakuolen,
- Ionenpumpmechanismen, die den aktiven Transport entlang von z. B. pH-Gradienten ermöglichen,
- Synthese von organischen Osmotika wie Aminosäuren, Zucker und Zuckeralkoholen als Gegengewicht zu gespeicherten Salzen zur Aufrechterhaltung des osmotischen Gleichgewichtes.

Mithilfe der Züchtung wird versucht, die polygen vererbte Salztoleranz von Nutzpflanzen zu erhöhen (Dadshani 2006).

2.5 Schädigung der Böden durch Salzwasser

Neben der möglichen Schädigung von Ackerflächen durch Bodenabtrag (Erosion) bei höheren Fließgeschwindigkeiten von Wasser im Allgemeinen sind weitere Schäden an Böden zu nennen, die besonders auf den Überstau mit salzhaltigem Wasser zurückzuführen sind.

Natriumreiche Überflutungswässer wie das Meerwasser mit einem Natriumanteil am Gesamtsalzgehalt von ~30 % (Tab. 2, Seite 7) führen bei tonreichen Böden zu einer erhöhten Na-Sättigung der Austauscher (Tonmineralien) und damit zu einem Strukturzerfall mit erhöhter Verschlammungsneigung und Tonverlagerung (Scheffer und Schachtschabel 2010). Verschlammte Böden weisen eine für den Pflanzenwuchs ungünstige Struktur und erhöhte Lagerungsdichte auf (Sauerstoffmangel). Ein verschlammter Oberboden zeigt eine höhere Erosionsanfälligkeit und kann nach oberflächennaher Austrocknung durch Krustenbildung insbesondere während der Keimung zu stark erhöhten Ausfällen führen. Zusätzlich wird die Wasserinfiltration durch Verschlammung behindert. Tonverlagerung kann zudem zu Einlagerungsverdichtungen im Bodenprofil führen und die Durchwurzelbarkeit sowie Wasserinfiltration (Stauwasser) beeinträchtigen.

Auf nicht kalkfreien Böden wie z. B. der Kalkmarsch kann die Zufuhr von natriumreichen Überflutungswässern infolge der Bildung von Soda ($\text{Na}_2[\text{CO}_3] \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) eine starke Alkalisierung bewirken. In alkalierten Böden führen pH-Werte ≥ 8 durch Festlegung von Nährelementen zu einer Einschränkung der Nährstoffverfügbarkeit für Pflanzen. Hier sind besonders die Nährelemente P, Fe, Mn, Cu und Zn betroffen (FINCK 2007).

Van der Molen (1957), der die Auswirkungen von Überschwemmungen auf landwirtschaftlich genutzte Flächen in den Niederlanden zum Gegenstand seiner Betrachtungen gemacht und insbesondere die Effekte der Gipsdüngung auf strukturgeschädigte Böden nach dem Überstau mit Meerwasser untersucht hat, sieht primär in dem Strukturzerfall tonreicher Böden durch Na-Aufsättigung die Ursache für die zum Teil langjährigen Ertragsverluste ehemals überschwemmter Flächen.

3 Kriterien für das Ausmaß der Schädigung landwirtschaftlicher Kulturen durch den Überstau mit Salzwasser

3.1 Salzgehalte, Salzfrachten, Salzeindringtiefen, Überstaudauer

Ein entscheidender Faktor für das Ausmaß von Salzschäden an landwirtschaftlichen Kulturen stellt der Salzgehalt dar. Es gilt zu unterscheiden zwischen den Salzgehalten

- im Meerwasser,
- im Überflutungswasser sowie
- in der Bodenlösung.

3.2 Salzgehalte im Meerwasser und Zusammensetzung des Salzes

Die Salzgehalte im Meerwasser sind u. a. von der geografischen Lage der Region, der Probenentnahmetiefe und der Jahreszeit sowie der Temperatur abhängig. Weiterhin werden die Salzgehalte von den Flussmündungsbereichen stark beeinflusst. Anhaltswerte zu den Salzgehalten im Meerwasser sind Tab. 1 zu entnehmen.

Tabelle 1: Salzgehalte im Meerwasser.

Region	Salzgehalte (%)
Nordsee (allgemein)	3,5
nördliche Nordsee	3,2–3,5
Skagerrak	3
Flussmündungen im Bereich der Nordsee	1,5–2,5
Ostsee (allgemein)	Ø 0,8
Finnischer Meerbusen und nördliche Bottensee	0,1
Ostsee in Ost-West-Richtung	0,3–1,8 (nach Westen zunehmend)
Kieler Bucht	1,5

Neben den Salzgehalten beeinflusst die Zusammensetzung des Salzes das Gefährdungspotential für Pflanze und Boden. Hier sind primär die pflanzenschädlichen Natrium- und Chloridanteile zu nennen. Die Zusammensetzung schwankt besonders in Abhängigkeit von der Nähe zu Flussmündungsbereichen (Tab. 2). Die absoluten Masseanteile sind Tab. 3 zu entnehmen.

Tabelle 2: Zusammensetzung des Meersalzes (Bergmann 2005).

Ionen	Elbe bei Hamburg (%)	Nordatlantik (%)
Chlorid	27,5	53,9
Sulfat	31,5	7,6
Kalium	1,9	1,1
Natrium	14,2	30,0
Calcium	20,7	3,3
Magnesium	3,4	3,6

Tabelle 3: Zusammensetzung des Meersalzes (bei 3.5 % Gesamtsalzgehalt im Meerwasser).

Ionen	Prozentanteil (%)	Masseanteil (g)
Chlorid	55	19,25
Natrium	30,61	10,7
Sulfat	7,7	2,7
Magnesium	3,7	1,3
Calcium	1,2	0,42
Kalium	1,1	0,39
Restbestandteile	0,7	0,25

3.3 Salzgehalte im Überflutungswasser

Die Salzgehalte im Überflutungswasser entsprechen nicht unbedingt den originären Salzgehalten des Meerwassers. In Abhängigkeit von der geografischen Lage des Überflutungsereignisses beeinflussen besonders Flussströme die Salzgehalte im Überflutungswasser. Nach der Februar-Sturmflut in 1962 wurden in den Überflutungswässern Salzgehalte zwischen 0.4 ‰ NaCl im Bereich der Elbe in der Region Stade-Jork-Hamburg sowie im Bereich der Weser bei Bremen und 25 ‰ NaCl im Bereich Ostfriesland bei Norden und Carolinensiel gemessen (Voigt 1964, Tab. 4).

Tabelle 4: Salzgehalte im Überflutungswasser nach der Sturmflut 1962 (Voigt 1964).

Region	Salzgehalt (‰ NaCl)
Stade, Jork, Hamburg (Elbe)	0,4
Bremen (Weser)	0,4
Brake (Weser)	1,2
Drochtersen (Elbe)	5,8
Oberndorf (Oste)	10
Cuxhaven	10
Balje (Elbe)	12
Augustgroden (östlicher Jadebusen)	13,5
Norden, Carolinensiel (Ostfriesland)	25

Zu beobachten ist weiterhin, dass in marinen Regionen relativ hohe Na- bzw. niedrige Ca-Gehalte und in fluviatilen Bereichen relativ niedrige Na- bzw. hohe Ca-Gehalte festzustellen sind (Voigt 1964).

3.4 Salzgehalte im Bodenwasser

Folgende Faktoren beeinflussen besonders den Salzgehalt in der Bodenlösung:

- Salzgehalt im Überstauwasser,
- Überstaudauer und Abflussgeschwindigkeit (Zustand der Drainagen und Vorfluter, Funktion der Schöpfwerke),
- Wasserdurchlässigkeit des Oberbodens in Abhängigkeit von der Bodenart, der Nutzung (Acker-Grünland), dem Bearbeitungszustand (Winterfurche, bestellt, ungepflügt) sowie von Verdichtungen (Pflugsohle, Stauhorizonte),
- Wassersättigung des Bodens vor dem Überflutungsereignis (Eindringwiderstand),

- kapillarer Aufstieg von Süßwasser (Verdünnung) und kapillarer Aufstieg von salzhaltigem Wasser (erneute Versalzung des Oberbodenprofils) sowie
- Höhe und Verteilung der Niederschläge (Auswaschung, Aussüßung).

Nach der Sturmflut am 16./17.02.1962 wurden zu Beginn der Frühjahrsbestellung in 5 bis 20 cm Bodentiefe Gehalte von 0.3 bis 25.4 g NaCl/l in der Bodenlösung gemessen (Tab. 5).

Tabelle 5: Salzgehalte in der Bodenlösung nach der Sturmflut 1962 (Hannoversche Land- und Forstwirtschaftliche Zeitung 1962d).

Region	NaCl-Gehalt (g/l)
Insel Neuwerk	5,7–25,4
Arensch-Berensch (Cuxhaven)	4,8–7,7
Spieka-Neufeld (Cuxhaven/Bremerhaven)	1,2
Freiburger Außendeich (Elbe)	1,4–11,3
Oberndorf (Oste)	1,1–10,6
Bentwisch-Bruch (Oste)	1,6–7,8
Basbeck (Hemmoor, Oste)	1,1–4,1
Bützfleth (Stade, Elbe)	0,3–1,1
Winsen (Hamburg-Harburg)	0,5–1,3
Ritterhude (Osterholz-Scharmbeck, Weser)	0,6–1,7
Bremen-Borgfeld (Weser)	0,5–0,7
Rade-Aschwarden (Weser)	0,6–1,1

3.5 Salzfrachten

Aussagen zu den durch die Sturmflut 1962 auf die landwirtschaftlichen Flächen aufgetragenen Salzmengen liefert Voigt (1964). Anhand der Salzgehalte im Wasser, des Wasservolumens im Boden und der Mächtigkeit der mit Salz angereicherten Schichten wurden folgende Salzfrachten ermittelt (Tab. 6):

Tabelle 6: Salzfrachten nach Überflutung (Voigt 1964).

Salzgehalt Überflutungswasser/Überstaudauer/Standort	Salzfrachten	
	10 Tage nach der Sturmflut	7 Monate nach der Sturmflut
25 ‰ Salzgehalt/2–14 Tage/Seemarsch	7–30 t/ha	4–15 t/ha
10 ‰ Salzgehalt/1–6 Tage/Seemarsch	3–4 t/ha	0.5-1 t/ha
10.3 ‰ Salzgehalt/1 Tag/Knickbrackmarsch	2 t/ha	1 t/ha

Tab. 6 zeigt zudem, dass ~7 Monate nach der Sturmflut die Salzmengen sich in den Probenmetiefen um ~50 % infolge von Niederschlägen verringert haben. Die im Landwirtschaftsblatt Weser-Ems (1962d) genannten Salzbelastungen auf Polderflächen in Ostfriesland bewegen sich in Abhängigkeit von der Überflutungsdauer in einem Bereich von 5 bis 15 t/ha bezogen auf 20 cm Bodentiefe.

3.6 Salzeindringtiefen

Die Salzeindringtiefen sind neben der Wasservorsättigung sowie den Grundwasserständen in den Böden primär von der Durchlässigkeit des Substrates sowie von der Überstaudauer abhängig. Bei gleicher Überflutungsdauer und gleichem Salzgehalt des Überflutungswassers wird die Salzanreicherung im Boden durch eine Zunahme der Durchlässigkeit gefördert. Die Salzanreicherung nimmt dabei mit steigender Überflutungsdauer zu. Bei „gut durchlässigem“ Grünland und einer Überflutungsdauer von zwölf Tagen wurden Eindringtiefen von ~70 cm beobachtet (Voigt 1964).

Zu beachten ist, dass nach Abfließen des Überflutungswassers das in das Bodenprofil eingetragene Salz mit dem Niederschlagswasser aus dem Oberboden in den Untergrund ausgewaschen bzw. entsprechend des Transpirationsanspruches der Pflanzen und Atmosphäre kapillar aufsteigt und wieder im Oberboden angereichert wird, sodass es in den Sommermonaten durch geringe Niederschläge und erhöhte Verdunstungsraten zu einer erneuten Salzzakkumulation im Oberboden kommen kann.

Somit ergeben sich in Abhängigkeit von der Niederschlagsverteilung, dem Temperaturverlauf, der angebauten Kulturart, der Kapillarität des Bodensubstrates und dem Flurabstand des Grundwassers sowie den Entwässerungsbedingungen der betroffenen Flächen im Zeitablauf eines oder mehrerer Jahre unterschiedlich stark ausgeprägte Oszillationskurven hinsichtlich der Salzbewegung im Bodenprofil.

3.7 Überstaudauer

Die Dauer des Überstaus wird besonders von der Topografie, den Entwässerungsbedingungen sowie von der Durchlässigkeit des Bodensubstrates beeinflusst. Das Landwirtschaftsblatt Weser-Ems (1962c, 1962e) berichtet nach der Sturmflut 1962 von Überflutungszeiträumen, die sich in verschiedenen Poldern über 1 bis 14 Tage erstreckten.

In den bisherigen Untersuchungen wurde ausschließlich der negative Effekt des Salzgehaltes auf die Entwicklung landwirtschaftlicher Kulturen berücksichtigt. Ein weiterer wichtiger ertragswirksamer Aspekt ist neben dem Salzgehalt der Sauerstoffmangel infolge des Überstaus mit Wasser allgemein. Dieser Effekt wurde in der Schriftenreihe der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft (2005) im Rahmen von Expertenbefragungen abgeschätzt. Bei einem vier bis sieben Tage andauernden Überstau mit Süßwasser in den Monaten November bis Februar werden Ertragsausfälle für Wintergetreide in Höhe von 10 % und für Raps in Höhe von 100 % genannt.

3.8 Elektrische Leitfähigkeit im Wasser und in der Bodenlösung

Die elektrische Leitfähigkeit (EC; Formelzeichen σ) wird international als Maß für den Versalzungsgrad (= Salinität) herangezogen und in Siemens pro Meter (S/m) angegeben. Sie lässt sich näherungsweise direkt aus dem Salzgehalt im Wasser ableiten.

Als internationaler Näherungswert gilt bei 25 °C (Lecher et al. 2001):

$$\sigma [\text{mS/cm}] * 0,64 = \text{Salzgehalt} [\text{g/l}] \text{ oder } [\text{‰}] \quad (1)$$

Dieser Näherungswert unterstellt eine bestimmte Mischung verschiedener Salze. Jedes einzelne Salz besitzt einen anderen Umrechnungsfaktor, der von Temperatur, Dissoziations-

grad und Wanderungsgeschwindigkeit im elektrischen Feld sowie elektrochemischer Wertigkeit und Ionenaktivität abhängig ist (Widmoser 1992). Kretschmar (1989) hat für Wasser in Schleswig-Holstein einen Näherungswert von 0.79 ermittelt.

Für Meerwasser mit einem Salzgehalt von ~35 ‰ kann eine elektrische Leitfähigkeit in Höhe von ~55 mS/cm bei 25°C angenommen werden. Mit sinkender Temperatur fällt der Wert für die elektrische Leitfähigkeit auf ~48 mS/cm bei 20°C.

Für die Pflanze ist jedoch nicht der Salzgehalt im Überflutungswasser, sondern der Salzgehalt in der Bodenlösung entscheidend. Der Salzgehalt in der Bodenlösung ist das Ergebnis der Interaktion zwischen dem Salzgehalt des Überflutungswassers und den Wasser-, Ton- und Humusgehalten (Kationen- und Anionenaustauscherkapazität) des Bodens. Zudem findet nach dem Überflutungsereignis eine Zufuhr über Niederschläge und kapillaren Aufstieg wie auch eine Abfuhr über Evapotranspiration und vertikalen sowie lateralen Abfluss statt (Oberflächen-, Zwischen- und Basisabfluss; LBEG 2008).

In der Technik der Bewässerungslandwirtschaft arider Gebiete werden daher Differenzierungen vorgenommen (FAO 1985):

- EC_w für die Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit im Bewässerungswasser,
- EC_e für die Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit im Bodensättigungsextrakt,
- EC_{sw} für die Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit in der Bodenlösung im Bereich der Wurzelzone.

Unter der Voraussetzung, dass 15–20 % der für die Bewässerung eingesetzten Wassermenge aus der Wurzelzone abgeführt wird und 80–85 % für die Evapotranspiration zur Verfügung steht, kann unter Verwendung entsprechender Konzentrationsfaktoren aus dem Versalzungsgrad des Bewässerungswassers näherungsweise auf den Versalzungsgrad in der Bodenlösung geschlossen werden (FAO 1985)

$$EC_{sw} = 3 * EC_w \quad (2)$$

$$EC_e = 1.5 * EC_w \quad (3)$$

$$EC_{sw} = 2 * EC_e \quad (4)$$

Danach wird sich im Bodensättigungsextrakt eine EC_e einstellen, die das 1.5-fache der EC_w des Bewässerungswassers erreicht. Die Bodenlösung EC_{sw} im Bereich der Wurzelzone wird sogar das Dreifache der EC_w des Bewässerungswassers bzw. das Doppelte der EC_e des Bodensättigungsextraktes annehmen.

In Abhängigkeit vom Ausmaß des oberirdischen Direktabflusses über die Entwässerungssysteme und der Höhe des Anteils der aus dem Wurzelraum ausgewaschenen Wassermenge am Überflutungswasser kann der Konzentrationsfaktor allerdings auch (erheblich) kleiner ausfallen. Kleinere Konzentrationsfaktoren hätten z. B. entsprechend geringere EC_e-Werte und somit geringere Ertragsausfälle zur Folge (Kap. 3.10).

Erhöht sich z. B. der Anteil der aus dem Wurzelraum ausgewaschenen Wassermenge am zugeführten Bewässerungswasser von ~20 % auf 50 %, so verringert sich der Konzentrationsfaktor von 1.5 auf 0.8.

$$EC_e = 0.8 * EC_w \quad (5)$$

Bei grob vereinfachender Anwendung vorgenannter Faktoren (2) bis (4) auf ein Überstau-Szenario mit Meerwasser, das einen Salzgehalt von 35 ‰ aufweist, würden sich folgende Werte ergeben:

- EC_w (Meerwasser) = 55 mS/cm
- EC_e (Bodensättigungsextrakt) = 83 mS/cm
- EC_{sw} (Wurzelraum) = 166 mS/cm

Die genannten Gesetzmäßigkeiten gelten allerdings nur für den Bereich des langjährigen Einsatzes von Bewässerungstechnik in der Landwirtschaft arider Gebiete und sind auf die deutschen Küstenregionen mit ihren humiden Klimaverhältnissen nicht ohne Weiteres übertragbar.

Die Werte in Tab. 7 gelten unter der Annahme, dass die Nordsee einen Salzgehalt von 35 ‰ aufweist und für humide Verhältnisse eher ein Konzentrationsfaktor von 0.8 als 1.5 angenommen werden kann. Damit ergeben sich gemäß (1) und (3) für den Bodensättigungsextrakt EC_e elektrische Leitfähigkeiten in Höhe von 44 mS/cm (Nordsee) bzw. 18 mS/cm (Ostsee).

Tabelle 7: Elektrische Leitfähigkeiten bei unterschiedlichen Konzentrationsfaktoren.

Konzentrationsfaktoren	Leitfähigkeiten (mS/cm)	Nordsee mit 35 ‰ Salzgehalt	Ostsee mit 15 ‰ Salzgehalt
	EC_w	55	23
1.5	EC_e	83	36
0.8	EC_e	44	18

3.9 Natrium-Adsorptionswert (SAR)

Die Natrium-Adsorption-Ratio (SAR) ist ein dimensionsloses Maß für die Gefährdung von Pflanzen durch eine hohe Na-Sättigung an den Austauschern (v. a. Tonminerale) im Boden. Über die Ermittlung des SAR wird der Natrium-Anteil im Bewässerungswasser bzw. in der Bodenlösung des Bodensättigungsextraktes im Verhältnis zu den Ca- und Mg-Ionen berücksichtigt, welcher eng mit der Na-Sättigung in den Böden korreliert. Zunehmende Na-Sättigung führt zu steigenden Gefügeproblemen und verringerten Infiltrationsraten besonders in feinkörnigen, schlecht entwässerbaren Böden (Verschlammung, Verkrustung, Luftabschluss, Sauerstoffarmut, Dichtlagerung, erschwertes Pflanzenwachstum). Der SAR-Wert dient zudem der Klassifizierung von Bewässerungswasser (Withers et al. (1978), Achtnich (1980), Lecher et al. (2001)). Mit steigendem SAR nimmt die Gefahr der direkten Pflanzenschädigung infolge des Erreichens kulturartenspezifischer toxischer Natrium-Konzentrationen wie z. B. bei besonders gegenüber Natrium empfindlichen Pflanzen wie Steinobst zu (Richards 1954).

Zusammen mit der Angabe zur elektrischen Leitfähigkeit des Bewässerungswassers EC_w erlaubt der SAR-Wert eine Aussage hinsichtlich der Qualität des Bewässerungswassers und zur möglichen Schadenswirkung auf den jeweiligen Boden und damit auf den Pflanzenbestand.

Bei gleicher elektrischer Leitfähigkeit des Bewässerungswassers EC_w führt ein steigender SAR zu einer zunehmenden Hemmung der Infiltrationsrate. Dagegen führt eine zunehmende elektrische Leitfähigkeit des Bewässerungswassers EC_w bei gleichem SAR zu einer Abnahme der Infiltrationsprobleme (FAO 1985).

Meerwasser würde einen SAR von ~58 sowie eine EC_w von ~50 mS/cm bzw. 50.000 µS/cm aufweisen. Ein Überstau landwirtschaftlich genutzter Flächen mit Meerwasser hätte besonders auf tonreichen Standorten entsprechend negative Konsequenzen hinsichtlich des Bodengefüges. Zudem wären sämtliche Standorte von der direkten Pflanzenschädigung durch Natrium betroffen.

3.10 Kulturartenspezifische Salztoleranz von Feldfrüchten

In Abb. 1 ist für aride Verhältnisse (Konzentrationsfaktor 1.5) die relative Ertragswirksamkeit in Abhängigkeit vom Salzgehalt im Beregnungswasser (EC_w) bzw. im Bodensättigungsextrakt (EC_e) bei unterschiedlich stark ausgeprägter Salztoleranz verschiedener Pflanzen dargestellt. Die Darstellung zeigt, dass salzempfindliche Kulturen wie Gartenbohnen, Zwiebeln und Äpfel schon bei einer EC_w von ~3 mS/cm Ertragsrückgänge von ~50 % aufweisen, während bei salztoleranten Kulturen wie Gerste, Spargel und Zuckerrüben erst bei einer EC_w von ~14 mS/cm ein Ertragsrückgang von 50 % zu beobachten ist (FAO 1985).

Ein Überstau mit Nord- bzw. Ostseewasser mit einer EC_w von ~55 mS/cm bzw. ~23 mS/cm hätte entsprechend drastische Auswirkungen auf die Erträge landwirtschaftlicher Kulturen.

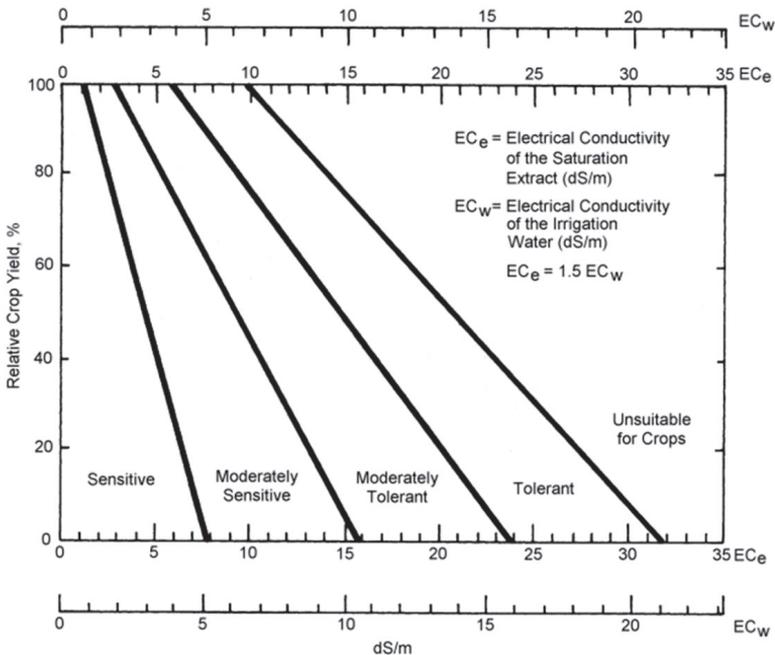


Abbildung 1: Salzgehalte und Ertragswirksamkeit in Abhängigkeit von der Salztoleranz der Pflanzen (FAO 1985).

In Tab. 8 ist der kulturartenspezifische Non-Effect-Level bezogen auf die elektrische Leitfähigkeit des Bodensättigungsextraktes EC_e sowie das Ausmaß des Ertragsabfalles

nach Überschreiten des Non-Effect-Levels dargestellt (aride Verhältnisse, Konzentrationsfaktor 1.5). Während Gerste und Roggen erst ab einer ECe von 8 bzw. 11.4 mS/cm mit Ertragsrückgängen reagieren, zeigen Kartoffeln und Mais schon bei ECe-Werten von 1.7 bzw. 1.8 mS/cm Ertragsabfälle.

Zusätzlich zum Non-Effect-Level ist das Ausmaß des Ertragsabfalles bei Überschreiten des Schwellenwertes aufgeführt: Während z. B. Gerste nach Überschreiten des Schwellenwertes bei jeder weiteren Zunahme des ECe um 1 mS/cm mit einem Ertragsabfall in Höhe von 5 % reagiert, zeigt Roggen eine sehr viel stärkere Sensitivität, indem bei Roggen mit Zunahme des ECe um 1 mS/cm ein Ertragsrückgang in Höhe von 10.8 % zu verzeichnen ist (Maas 1993, Hillel 2000, FAO 2002).

Tabelle 8: Schwellenwerte und Ertragswirksamkeit (Maas 1993, Hillel 2000, FAO 2002).

Kultur	Relative Salztoleranz diverser Kulturen	
	Ertragswirksamer Schwellenwert (ECe in mS/cm)	Ertragsabfall ab Schwellenwert (in % per mS/cm)
Mais	1,8	7,4
Raps	11,0	13,0
Roggen	11,4	10,8
Weizen	6,0	7,1
Zuckerrübe	7,0	5,9
Wiesenrotklee	1,5	12,0
Wiesenfuchsschwanz	1,5	9,6
Weißklee	1,5	12,0
Kartoffel	1,7	12,0
Gerste	8,0	5,0
Deutsches Weidelgras	5,6	7,6

Zu beachten ist, dass die Salztoleranz in Abhängigkeit vom Entwicklungsstadium der jeweiligen Kultur während einer Vegetationsperiode starken Schwankungen unterliegen kann (Tab. 9).

Tabelle 9: Relative Salztoleranz während des Auflaufens (Hillel 2000, FAO 1985)

Kultur	50 % Ausfall beim Auflaufen (ECe in mS/cm)
Gartenbohne	8
Zuckerrübe *	6–12.5
Luzerne	8.2–13.4
Kopfkohl	13
Weizen **	14–16
Gerste **	16–24
Körnermais	21–24

* In den Stadien der Keimung und des Auflaufens sehr sensibel. ECe sollte 3 mS/cm nicht überschreiten (HILLEL 2000; FAO 1985):

** In den Stadien der Keimung und des Auflaufens sehr sensibel. ECe sollte 4-5 mS/cm nicht überschreiten (FAO 1985):

3.11 Austauschhäufigkeit des Bodenprofils

Die Standortfaktoren Boden und Klima beeinflussen in starkem Maße die Ertragswirksamkeit einer Überflutung mit Salzwasser auf landwirtschaftliche Kulturen. Der Zeitraum bis zur Wiederherstellung der ursprünglichen Ertragsfähigkeit betroffener Standorte hängt außer vom Sorptionsvermögen des Bodens gegenüber Salzen wie hauptsächlich Natrium (Kationenaustauscherkapazität) besonders von der Menge und Verlagerungsgeschwindigkeit des Sickerwassers ab.

Es bietet sich an, analog der in der DIN 19732 dargestellten Methode zur Bestimmung des standörtlichen Verlagerungspotentials von nichtsorbierbaren Stoffen bei Salzwasserüberstau, in einer groben Annäherung ähnlich zu verfahren. Während die DIN 19732 z. B. zur Ermittlung der Auswaschungsgefährdung von nichtsorbierbarem Nitrat im Rahmen des Trinkwasserschutzes Verwendung findet, gilt es zu beachten, dass im Falle des Salzwasserüberstaus besonders das sorbierbare Natrium-Kation im Fokus steht. Das Ausmaß der Na^+ -Sorptions eines Bodens ist primär von den Tongehalten sowie von der Art der Tonminerale abhängig (Kuntze et al. 1988, Scheffer und Schachtschabel 2010). Mit zunehmenden Tongehalten sowie mit zunehmendem Anteil von Dreischicht-Tonmineralen (Illite, Glaukonite, Smectite, Vermiculite) gegenüber Zweischicht-Tonmineralen (Kaolinite, Halloysite) steigt das Na-Sorptionsvermögen eines Bodens an. Neben den Tongehalten beeinflusst der Gehalt der Böden an organischer Substanz die Fähigkeit zur Kationenadsorption, allerdings ist die Fähigkeit der organischen Substanz zur Kationenadsorption stark pH-abhängig. Mit abnehmenden pH-Werten und zunehmendem Anteil von Protonen in der Bodenlösung sinkt die Kationenaustauschkapazität.

Im Gegensatz zu den tonarmen und sauren Sand-/Moorstandorten der Geest sind die Böden der tonreichen und weniger sauren (z. T. alkalischen) Marschen durch ein hohes Na-Sorptionsvermögen gekennzeichnet. Somit ist die Anwendung der Methode zur Abschätzung der Entsalzungsdauer für Marschböden mit einem höheren Fehler versehen als dieses bei den sandigen Geestböden der Fall ist.

Die Austauschhäufigkeit η_s beschreibt, wie häufig das Sickerwasser SR innerhalb eines Jahres den Wasservorrat des durchwurzelten Bodens FKW_e austauscht (Formel 6)

$$\eta_s = \frac{SR}{FKW_e} \quad (6)$$

η_s : Austauschhäufigkeit [1/a]

SR: Sickerwasserrate [mm/a]

FKWe: Feldkapazität im effektiven Wurzelraum [mm]

Die Feldkapazität FK stellt den Gehalt an Bodenwasser in Volumen-Prozent dar, den ein Boden maximal gegen die Schwerkraft speichern kann. Diese Bindung erfolgt in Poren mit einem Äquivalentdurchmesser von $\leq 50 \mu\text{m}$ oder bei einer Saugspannung von $pF \geq 1.8$ (Ad-Hoc Arbeitsgruppe Boden 2005). Üblicherweise erreicht ein Boden seine Feldkapazität zwei bis drei Tage nach erfolgter voller Wasseraufsättigung (DIN 19732). Mit dem effektiven Wurzelraum W_e wird die rechnerisch bestimmte Mächtigkeit einer von Bodenart und Trockenrohdichte abhängigen Bodenzone beschrieben, die vom Wurzelsystem der Pflanzen ausgeschöpft werden kann (Ad-Hoc Arbeitsgruppe Boden 2005).

Die W_e ist nicht identisch mit der Durchwurzelungstiefe. Die Methoden zur Ermittlung der Sickerwasserrate und Feldkapazität sowie deren Kennwerte für verschiedene Standortbedingungen sind in LBEG (2011) beschrieben.

Tabelle 10: Bewertung der Austauschhäufigkeit (DIN 19732).

Austauschhäufigkeit (1/a)	< 0.7	0.7–1.0	> 1.0–1.5	> 1.5–2.5	> 2.5
Bewertung	sehr gering	gering	mittel	groß	sehr groß
Klasse	1	2	3	4	5

Die Austauschhäufigkeit steigt mit zunehmender Sickerwasserrate und mit sinkender Feldkapazität im Wurzelraum. Die Bewertung der Austauschhäufigkeit ist Tab. 10 zu entnehmen.

Nach Aussage des LBEG (schriftliche Mitteilung von Dr. Schäfer vom 07.06.2012) kann davon ausgegangen werden, dass bei einer Austauschhäufigkeit von 200 % der Wurzelraum innerhalb eines Jahres entsalzen ist. Beträgt die Austauschhäufigkeit eines Standortes dagegen lediglich 100 %, würden zwei Jahre für eine vollständige Entsalzung erforderlich sein.

3.12 Gesamtdarstellung der Einflussgrößen auf Ertragsverluste durch Salzwasserüberstau

Die folgende Zusammenfassung stellt die möglichen Faktoren dar, die auf die Höhe von Ertragsausfällen einen maßgeblichen Einfluss ausüben können:

- Salzgehalt des Wassers und der Bodenlösung (Gesamtsalzgehalt, Natrium-, Chloridgehalte, elektrische Leitfähigkeit, SAR-Wert, Magnesiumzustand)
- Höhe und Verteilung der Niederschläge (Auswaschungsgeschwindigkeit)
- Temperaturverlauf besonders während der Vegetationsperiode (Evapotranspiration, kapillare Nachlieferung salzhaltigen Wassers)
- Zustand/Leistung der Entwässerungssysteme (Grüppen, Dräne, Vorfluter, Schöpfwerke). Beispiel Drainage: „Nur direkt über dem Drainkanal (9 ‰ NaCl) war der Raps zur Blüte gekommen. Daneben (30 ‰ NaCl) kamen nur Halophyten durch.“ (Wohlenberg 1964)
- Verdünnung über Flussläufe (s. a. Sturmflut 1962 im Bereich Elbe, Oste, Weser)
- Zeitpunkt und Dauer des Überstaus (Vegetationsstadium der Kulturen)
- Vorsättigung des Bodens (Eindringwiderstand, Verdünnung)
- Kationenaustauscherkapazität des Bodens (Bodenart, pH-Wert, Ionen-Belegung, Na-Sättigung) → Aggregatstabilität, Austauschervermögen
- Versorgungsgrad des Bodens mit Hauptnährelementen (z. B. Kalium) und Kalkversorgung (pH)
- Ernährungszustand der Kultur (bes. Ca, K, N), z. B. erhöhen hohe K-Gehalte in der Pflanze deren Salztoleranz (Schleiff 1974a, 1974b)
- Bearbeitungszustand des Bodens vor Überflutung (unbearbeitet, Pflugbrache, bestellt)
- Strukturstabilität des Bodens vor Überstau (stabiles Krümelgefüge, Kohärentgefüge, Einzelkorngefüge)

- Tiefe des Grundwasserspiegels (Abfuhr salzhaltigen Wassers, Aufstieg Süßwasser)
- Kapillarität des Bodens (Wiederaufstieg salzhaltigen Wassers, Aufstieg Süßwasser)

4 Vorgehensweise zur Ermittlung potentieller Schäden auf landwirtschaftlichen Flächen

4.1 Methode

Über die Feldblöcke¹ des landwirtschaftlichen Flächenkatasters werden die tatsächlich landwirtschaftlich genutzten Flächen in den jeweiligen Projektgebieten lokalisiert. Hinsichtlich der Fruchtartenverteilung (z. B. Winterweizen, Winterraps, Weiden etc.) standen für Schleswig-Holstein lediglich Angaben zu den Kulturartenanteilen in den einzelnen Feldblöcken zur Verfügung. Bei mehreren Fruchtarten innerhalb eines Feldblockes (= Regelfall) war eine geografische Zuordnung der Kulturen innerhalb eines Feldblockes daher nicht möglich. Es werden in den schleswig-holsteinischen Gebieten für die einzelnen Kulturen die Schadenspotentiale ermittelt und auf Feldebene die nach Grünland und Ackernutzung flächengewichteten Durchschnittswerte berechnet.

Im Gegensatz zu Schleswig-Holstein lagen für Niedersachsen die sogenannten Schlagskizzen zu den Feldblöcken aus dem GAP-Antragsverfahren vor, die jeder Empfänger von Direktzahlungen seinem Antrag auf Prämienzahlungen beizufügen hat. In den Schlagskizzen sind für das jeweilige Anbaujahr die landwirtschaftliche Kultur sowie die Flächengröße hinterlegt. Zudem sind die Schlagskizzen geografisch verortet. Somit sind die jeweiligen Kulturen auch innerhalb eines Feldblockes lokalisierbar. Dieser Umstand ermöglicht für den niedersächsischen Betrachtungsraum eine detailliertere Darstellung auf Schlägebene. Da die Schlagskizzen von den Antragstellern (Landwirten) digitalisiert werden, ergeben sich in Einzelfällen gewisse Ungenauigkeiten hinsichtlich ihrer geografischen Lage.

Anhand der bodenkundlichen Informationen in den Bodenkarten zu Bodentypen, zu Bodenartenschichtungen im Profil sowie zum Ausgangssubstrat werden Standortklassen annähernd vergleichbarer Ertragsbedingungen definiert (Ertragsklassen „hoch“ bzw. „niedrig“). Das Ergebnis dieser Klassenbildung ist der folgenden Darstellung zu entnehmen:

Projektgebiet Norden mit den Standortklassen:

- Marsch (Kalk-, Klei-, Knick-, Organo-, Rohmarschen)/Ertragsklasse „hoch“,
- Marsch/Moor (Erd-Niedermoore mit marinen Sedimenten in der Profilabfolge, Niedermoore mit Knickmarschauflage, Klei- und Knickmarschen unterlagert von Niedermoor bzw. von Hochmoor)/Ertragsklasse „hoch“,
- Geest bzw. Sande (Podsole, Braunerden, Pseudogleye, Gleye, Plaggenesche, Treposole aus Niedermoor über Gley bzw. aus Hochmoor über Gley)/Ertragsklasse „niedrig“,
- Geest/Moor (Erd-Hochmoore, Erd-Niedermoore, Gleye mit Erd-Niedermoorauflage, Gley-Podsole mit Erd-Hochmoorauflage, Podsol-Gleye mit Erd-Hochmoorauflage, Hochmoore mit Deckkulturbodenauflage)/Ertragsklasse „niedrig“.

¹ Der Feldblock wurde als Teil des digitalen landwirtschaftlichen Flächenkatasters als neues System zur Flächenidentifizierung in mehreren Bundesländern Deutschlands im Zuge der EU-Agrarreform 2005/2006 eingeführt. Er umfasst eine oder mehrere landwirtschaftlich genutzte Schläge.

Projektgebiet Pellworm mit den Standortklassen:

- Kalkmarsch/Ertragsklasse „hoch“,
- Klei- und Dwogmarsch/Ertragsklasse „hoch“,
- Knick- und Dwogmarsch/Ertragsklasse „hoch“.

Über die Verschneidung der Fruchtartenverteilung mit den Standortklassen im GIS erfolgte die Ermittlung der Anbauverhältnisse in den jeweiligen Standortklassen. Da die Grenzen der landwirtschaftlichen Nutzungseinheiten wie Schlagsskizzen (Niedersachsen) oder Feldblöcke (Schleswig-Holstein) im Regelfall nicht mit den bodentypologischen Grenzen deckungsgleich sind (z. B. wenn ein Feldblock mehrere Bodentypen enthält), wurde der landwirtschaftlichen Nutzungseinheit über GIS-Methoden der Bodentyp zugeordnet, der den größten Flächenanteil im Feldblock bzw. in der Schlagsskizze aufgewiesen hat.

Anschließend wurde unter Annahme definierter Szenarien anhand der Anbauverhältnisse in den jeweiligen Standortklassen eine monetäre Bewertung angenommener Ertragsausfälle durchgeführt.

4.2 Projektgebiet Norden

Das Projektgebiet Norden (Abb. 2) umfasst ~37.750 ha landwirtschaftlich genutzte Fläche, die zu annähernd 70 % von Marschstandorten geprägt ist (Tab. 11). Bei den Marschböden dominieren die Kalk-, Klei- und Knickmarschen (Standortklasse Marsch, Ertragsklasse „hoch“) aus marin-brackischen Sedimenten mit wechselnden Ton- und Schluffanteilen, die zu kleineren Anteilen von Niedermooren unterlagert sein können (Standortklasse Marsch/Moor, Ertragsklasse „hoch“). Die verbleibenden ~30 % der landwirtschaftlich genutzten Fläche sind den leichteren, wasserzügigeren Geeststandorten zuzurechnen, die sich vorwiegend aus vom Grundwasser beeinflussten Gley-Podsolen aus fluviatilen Sanden mit z. T. anthropogener Überprägung (Plaggenesche) zusammensetzen (Standortklasse Geest, Ertragsklasse „niedrig“). Neben dem Podsol mit seinen Subtypen aus fluviatilen Sanden, Flugsanden und Geschiebedecksanden sind ebenfalls Gleye und Pseudogleye mit ihren Subtypen vertreten (Standortklasse Geest, Ertragsklasse „niedrig“).

Bei den von Stauwasser beeinflussten Böden sind oftmals Flugsandlagen von Geschiebelehmern oder Lauenburger Tonen unterlagert. Zudem finden sich Tiefumbruchböden (Trepsole), die durch die tiefgreifende maschinelle Bodenbearbeitung des Tiefpflügens von vorwiegend Niedermooren über Gleyen aus Sanden entstanden sind (Standortklasse Geest, Ertragsklasse „niedrig“) und nach der Melioration und Entwässerung eine erhöhte Wasserdurchlässigkeit aufweisen als die ursprünglichen Moorstandorte.

Geringe Flächenumfänge nehmen die rein organischen Standorte (Erd-Niedermoore, Erd-Hochmoore) sowie die Grundwasser beeinflussten, mineralischen Standorte mit Torfaufagen ein (Standortklasse Geest/Moor, Ertragsklasse „niedrig“). Abb. 2 zeigt die Verbreitung der vier Standortklassen im Projektgebiet Norden. Die Verschneidung der Standortklassen mit den Schlagsskizzen zur Nutzung über ein GIS führt zu den Anbauverhältnissen 2010 in den jeweiligen Standortklassen (Tab. 12).

Tabelle 11: Standortklassen und Bodentypen im Projektgebiet Norden.

Standortklassen (Ertragsklassen)	Bodentypen	Fläche LF (ha)
Marsch („hoch“)	Kalkmarsch	16.188
	Kleimarsch	5.448
	Knickmarsch	1.275
	Organomarsch	755
	Rohmarsch	151
Marsch/Moor („hoch“)	Knickmarsch unterlagert von Niedermoor	1.356
	Niedermoor mit Knickmarschauflage	347
	Kleimarsch unterlagert von Niedermoor	54
	Erd-Niedermoor mit marinen Sedimenten	48
	Kleimarsch unterlagert von Hochmoor	48
Geest („niedrig“)	Gley-Podsol	2.931
	Gley-Podsol mit Plaggenauflage	1.375
	Plaggenesch unterlagert von Podsol-Gley	839
	Pseudogley-Podsol	828
	Plaggenesch unterlagert von Pseudogley	730
	Podsol	691
	Tiefumbruchboden	620
	Pseudogley-Podsol mit Plaggenauflage	539
	Plaggenesch unterlagert von Pseudogley-Braunerde	460
	Gley	453
	Pseudogley-Gley	337
	Pseudogley	245
	Podsol-Gley	191
	Plaggenesch	127
	Plaggenesch unterlagert von Podsol	116
	Podsol-Pseudogley	99
	Plaggenesch unterlagert von Braunerde	87
	Gley-Pseudogley	79
	Plaggenesch unterlagert von Gley	75
	Gley-Regosol	18
Geest/Moor („niedrig“)	Podsol-Gley mit Erd-Hochmoorauflage	404
	Erd-Niedermoor/Erd-Hochmoor	275/242
	Gley-Podsol mit Erd-Hochmoorauflage	137
	Hochmoor mit Deckkulturbodenaufilage	129
	Gley mit Erd-Niedermoorauflage	36
	Gesamtfläche (LF):	37.732

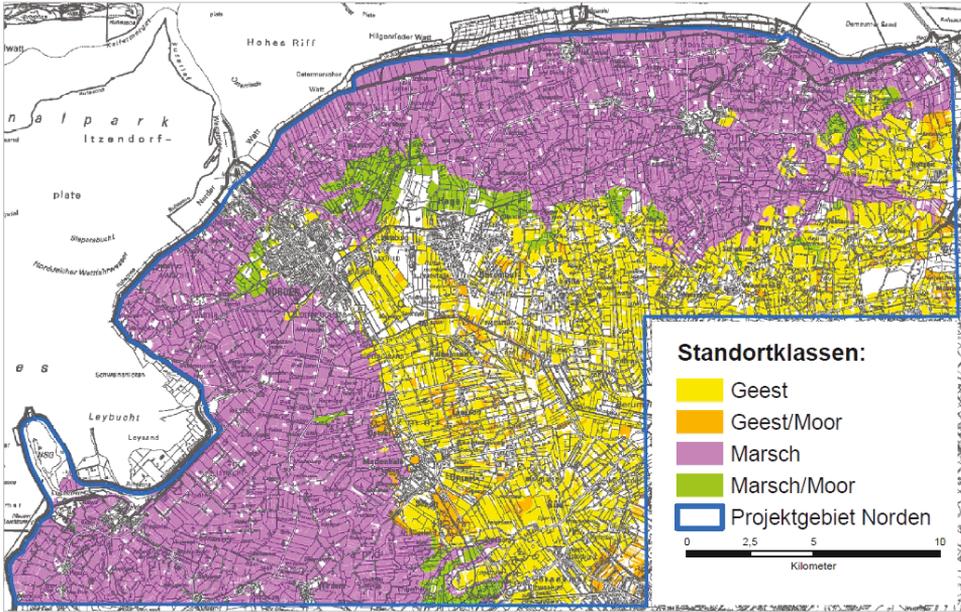


Abbildung 2: Verbreitung der Standortklassen im Projektgebiet Norden.

Tabelle 12: Anbauverhältnisse im Projektgebiet Norden.

Standortklassen	Grünlandanteil	Ackeranteil	Anbauverhältnis Acker (2010) SM = Silomais; FG = Feldgras
Projektgebiet Norden gesamt (~37.750 ha LF)	43 %	57 %	Wintergetreide (53 %) – SM (26 %) – Winterraps (8 %) – FG (6 %) – Sommergetreide (3 %)
Marsch (~23.800 ha LF)	39 %	61 %	Wintergetreide (66 %) – Winterraps (12 %) – SM (10 %) – Sommerge- treide (3 %) – FG (6 %)
Marsch/Moor (~1.850 ha LF)	62 %	38 %	Wintergetreide (42 %) – FG (28 %) – SM (25 %) – Winterraps (3 %) – Sommergetreide (2 %)
Geest (~10.800 ha LF)	50 %	50 %	SM (66 %) – Wintergetreide (23 %) – Sommergetreide (6 %) – FG (3 %)
Geest/Moor (~1.280 ha LF)	53 %	47 %	SM (61 %) – Wintergetreide (28 %) – Sommergetreide (4 %) – FG (4 %)

Die Darstellung in Tab. 12 zeigt tendenziell die Vorzüglichkeit der Standortklassen für bestimmte Früchte. Während z. B. der Silomaisanteil an der Ackernutzung im Geestbereich ~61–66 % beträgt, erreicht dieser in der Marsch lediglich 10 %. Analog fällt der Wintergetreideanteil an der Ackernutzung im Geestbereich auf ~23–28 %, während dieser in der Marsch auf 66 % ansteigt. Auch ist der Grünlandanteil an der landwirtschaftlichen Nutzfläche im Geestbereich mit ~50–53 % höher als auf den Marschstandorten mit

39 %. Nur die mit Niedermooren unterlagerten Marschstandorte weisen mit 62 % einen höheren Grünlandanteil auf. Dabei handelt es sich in der Regel um absolutes Grünland, das eine Ackernutzung unter dem Gesichtspunkt einer ordnungsgemäßen Landwirtschaft nicht zulässt.

Wie in Kap. 3.11 dargestellt, lässt sich über die Berechnung der Austauschhäufigkeit des Bodens die Zeitdauer für die Entsalzung näherungsweise abschätzen. Unter der Annahme, dass die Entsalzung nach zweimaliger Durchwaschung des Wurzelraumes mit dem Sickerwasser als abgeschlossen gilt, ergibt sich für das Projektgebiet Norden die Darstellung in Abb. 3.

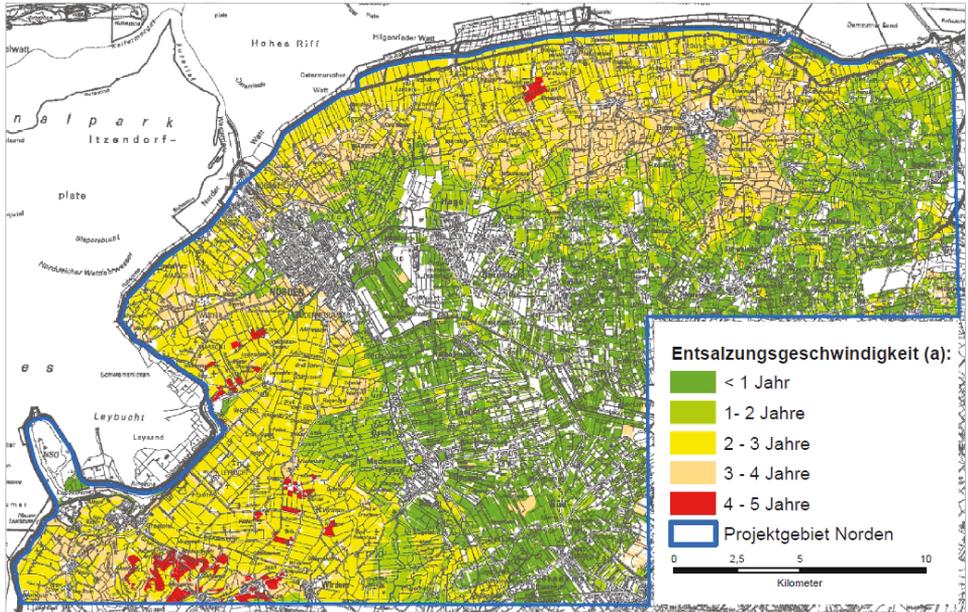


Abbildung 3: Entsalzungsgeschwindigkeit im Projektgebiet Norden.

Abb. 3 zeigt, dass im Bereich der Marschen (Standortklasse Marsch sowie Marsch/Moor) mit einer Entsalzungsgeschwindigkeit von zwei bis vier Jahren (z. T. ein bis zwei bzw. vier bis fünf Jahre) zu rechnen ist. Für die Geeststandorte (Standortklassen Geest sowie Geest/Moor) sind dagegen überwiegend Zeiträume von weniger als einem Jahr anzunehmen (z. T. ein bis zwei bzw. drei bis vier Jahre).

Die Klimatische Wasserbilanz (KWB) für den Festlandbereich des Projektgebietes Norden ist in Abb. 4 exemplarisch anhand der Klimadaten der Wetterstation Emden (1961–2011; DWD) dargestellt und weist tendenziell lediglich für die Monate April und Mai ein negatives Saldo von -3 bzw. -8 mm auf.

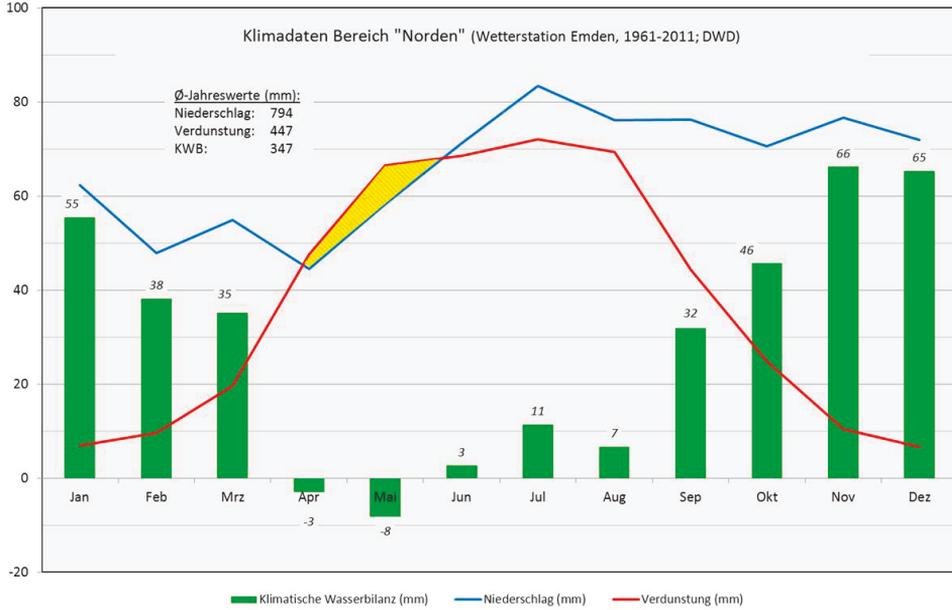


Abbildung 4: Klimatische Wasserbilanz „Norden“.

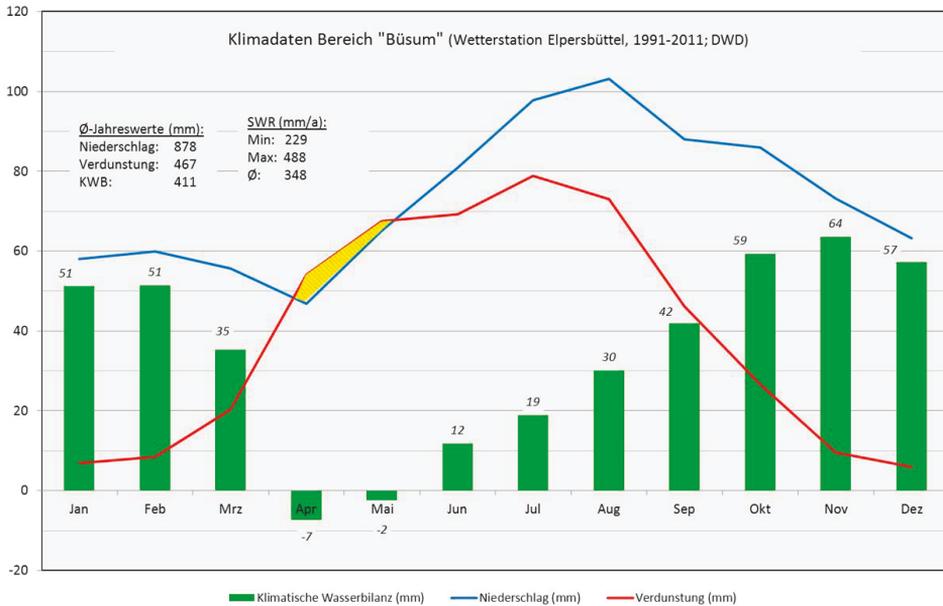


Abbildung 5: Klimatische Wasserbilanz „Büsum“.

4.3 Projektgebiet Pellworm

Das Projektgebiet Pellworm weist eine landwirtschaftlich genutzte Fläche von ~2.700 ha auf, die ohne Ausnahme den Marschen und damit der Ertragsklasse „hoch“ für die Schadensermittlung zuzuordnen ist. Eine ertragliche Herabstufung der Knick- und Dwogmarschen wurde nicht vorgenommen.

Es dominieren die Klei- und Dwogmarschen aus schluffig-tonigen, marinen Sedimenten sowie die Knick- und Dwogmarschen aus tonigen, brackischen Ablagerungen. Kleinere Flächenanteile sind den Kalkmarschen aus schluffigen, marinen Sedimenten zuzuweisen (Tab. 13).

Tabelle 13: Bodentypen im Projektgebiet Pellworm.

Bodentypen/Ertragsklassen	Fläche LF (ha)
Klei-, Dwogmarsch/„hoch“	1.934
Knick-, Dwogmarsch/„hoch“	549
Kalkmarsch/„hoch“	220
Gesamtfläche (LF):	2.703

Der Abb. 6 ist die Verbreitung der Bodentypen im Projektgebiet Pellworm zu entnehmen.

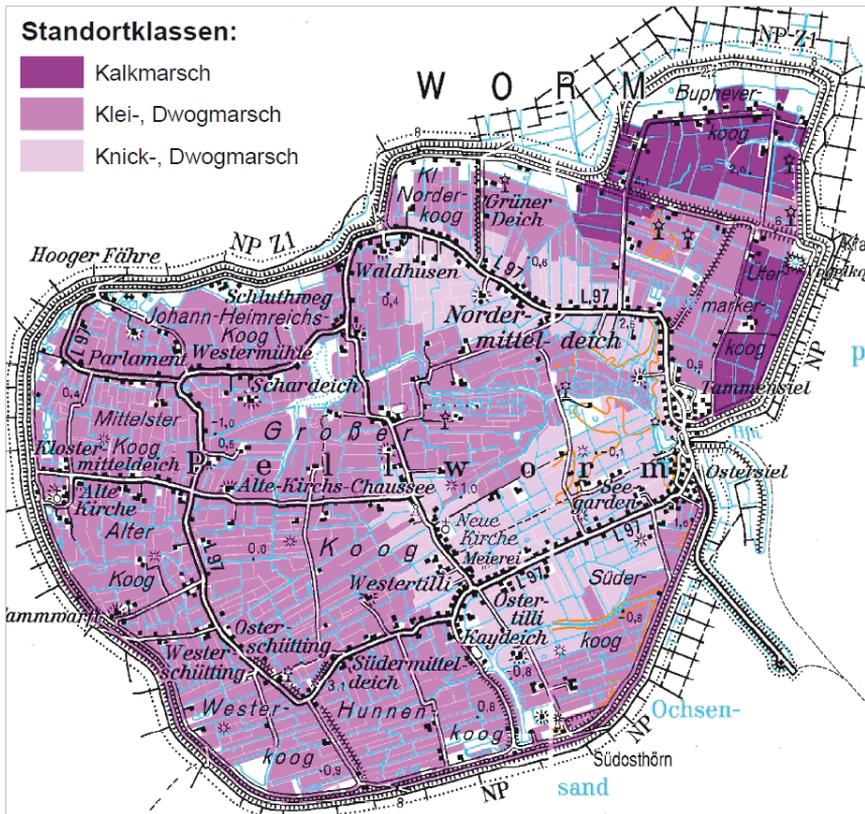


Abbildung 6: Verbreitung der Bodentypen im Projektgebiet Pellworm.

Tab. 14 zeigt die Vorzüglichkeit der Bodentypen für entsprechende Fruchtarten. Die wesentlich schlechteren Standorte wie die Dwog- und Knickmarschen weisen im Vergleich zu den erheblich besseren Standorten der Kalkmarsch einen höheren Grünlandanteil auf (55 zu 28 %). Gleichzeitig liegt der Anteil des Getreideanbaus an der Ackerfläche im Bereich der Kalkmarsch mit ~70 % über den entsprechenden Anteil im Bereich der Klei-, Knick- und Dwogmarschen (42–44 % Getreideanbau). Zudem ist der Anteil an Feldgras- sowie Klee- und Klee grasbeständen im Bereich der Klei-, Knick- und Dwogmarschen mit 27–41 % deutlich höher als auf den Kalkmarschstandorten (10 %).

Tabelle 14: Anbauverhältnisse im Projektgebiet Pellworm.

Bodentypen	Grünlandanteil	Ackeranteil	Anbauverhältnis Acker (2011)
Projektgebiet Pellworm gesamt (~2.700 ha LF)	47 %	53 %	Wintergetreide (43 %) – Mais (22 %) – FG* (14 %) – Klee, Klee gras (13 %) – Sommergetreide (11 %) – Raps (4 %)
Kalkmarsch (~220 ha LF)	28 %	72 %	Wintergetreide (53 %) – Sommergetreide (17 %) – Silomais (16 %) – Klee, Klee gras (10 %) – Leguminosen (3 %)
Klei-, Dwogmarsch (~1.930 ha LF)	48 %	52 %	Wintergetreide (32 %) – Mais (25 %) – FG (16 %) – Klee, Klee gras (11 %) – Sommergetreide (10 %) – Raps (5 %)
Knick-, Dwogmarsch (~550 ha LF)	55 %	45 %	Wintergetreide (29 %) – Klee, Klee gras (25 %) – FG (16 %) – Sommergetreide (15 %) – Mais (12 %) – Leguminosen (2 %)

*FG: Feldgras

Die Entsalzungsgeschwindigkeiten im Projektgebiet Pellworm liegen vorwiegend im Bereich von zwei bis drei Jahren. Kleinere Flächenanteile weisen Zeiträume von ein bis zwei bzw. drei bis vier Jahren auf (Abb. 7). Hinsichtlich der KWB ist stellvertretend auf die Darstellung in Abb. 5 (Büsum) zu verweisen.

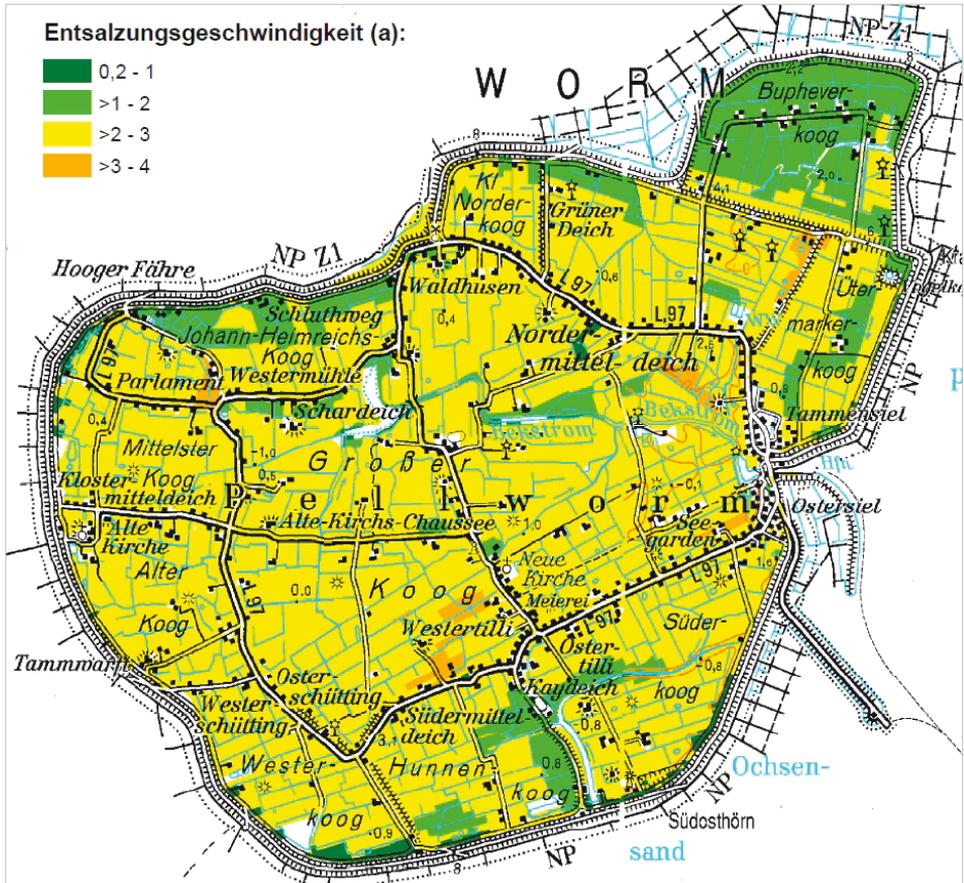


Abbildung 7: Entsalzungsgeschwindigkeit im Projektgebiet Pellworm.

4.4 Szenario-Annahmen für die Überflutung landwirtschaftlicher Flächen mit Salzwasser

Während Hochwasser-Ereignisse infolge der Überschwemmung mit Süßwasser sich während des gesamten Jahres ereignen und somit auch Bestände abreifender Kulturen betroffen sein können, ist die Überflutung mit Salzwasser während einer Sturmflut für die Monate November bis Februar anzunehmen. In diesem Zeitraum befinden sich die landwirtschaftlichen Kulturen in einem frühen Entwicklungsstadium (Wintergetreide, Winterraps) sowie überwiegend in der Winterruhe. Etliche Früchte wurden vorher geerntet (Raps, Sommer- und Wintergetreide, Ackergras, Mais, Kartoffeln, Zuckerrüben) und das Grünland erfuhr seine letzte Nutzung im Jahr durch Beweidung oder Schnitt. Weiterhin tragen während dieser Monate viele Ackerflächen Zwischenfrüchte wie Ackersenf, Ölrettich oder Winterrüben lediglich zur Gründüngung oder liegen brach. Der überwiegende Teil der Kulturmaßnahmen und damit die betrieblichen Ausgaben sind noch nicht getätigt und stehen erst nach Februar an (z. B. Düngung und Pflanzenschutz sowie die Bestellung der Sommerkulturen). Im Allgemeinen unterschreitet die monetäre Schadens-

höhe bei einem Überflutungsereignis im November bis Februar den Schaden, der bei einer Überschwemmung im Hochsommer zu beklagen wäre, da sich zu diesem Zeitpunkt viele Kulturen in der Abreife befinden und der überwiegende Teil betrieblicher Ausgaben bereits getätigt worden ist.

Bei der Berechnung der Schäden für die landwirtschaftliche Bodennutzung wurden folgende Aspekte berücksichtigt:

- ein durchschnittliches Ertragsniveau der jeweiligen Kulturen differenziert nach relativer Standortgüte (Ertragsklasse „hoch“ bzw. Ertragsklasse „niedrig“), da höhere Ertragspotentiale zu größeren Schadensauswirkungen führen (z. B. Marsch- und Geeststandorte),
- der durchschnittliche Verkaufspreis für die jeweiligen Ernteprodukte, berechnet aus den Erntejahren 2009, 2010 sowie 2011,
- die durchschnittlichen Ausgaben für Mineraldünger, Pflanzenschutz sowie variablen Maschinenkosten für die jeweiligen Früchte, berechnet aus den Erntejahren 2009, 2010 sowie 2011,
- die durchschnittlichen Deckungsbeiträge für die jeweiligen Kulturen, berechnet auf Basis der Richtwert-Deckungsbeiträge der Landwirtschaftskammer Niedersachsen aus den Erntejahren 2009, 2010 sowie 2011 (Landwirtschaftskammer Niedersachsen 2010, 2011, 2012)
- Einsparung von Betriebsaufwendungen und Arbeitszeit durch nicht erfolgte Weiternutzung (z. B. nicht erfolgte Düngung, Pflanzenschutzmaßnahmen, maschinelle Bearbeitungsgänge),
- Aufwendungen für Grasneuansaat bei Grünland und Ackergrasnutzung (Neuanfaat mit Umbruch auf 50 % der Flächen),
- Aufwendungen für Meliorationsmaßnahmen (Arbeitszeit, Gipsdüngung auf ackergenutzte Marschstandorte mit 15 dt/ha bzw. Superphosphatdüngung auf den übrigen Flächen mit 7.5 dt/ha, Ausbringungskosten, Grabenreinigung, Spülung der Drainsysteme, Bodenuntersuchungen auf Salzgehalte und pH-Wert sowie auf Grundnährstoffe wie Phosphat, Kalium und Magnesium),
- Ertragsausfall durch Mindererträge bei den jeweiligen Kulturen (100 % im Szenario 1 auf allen Flächen sowie zusätzlich 25 % im Szenario 2 auf den weniger wasser-durchlässigen Standorten wie den Marschen oder Parabraunerden aus Geschiebelehm).

Grundlage der betriebswirtschaftlichen Daten sind eigene Erhebungen der Landwirtschaftskammer von Markt- und Preisstatistiken sowie Daten des Kuratoriums für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft für die Herleitung des Arbeitszeitbedarfes und der Maschinenkosten (KTBL 2012). Eine Durchschnittsbetrachtung der letzten drei Erntejahre soll Marktschwankungen ausgleichen und ein aussagekräftiges Ergebnis liefern im Gegensatz zu einer isolierten Betrachtung über nur ein Vegetationsjahr. Zusätzlich anfallende Arbeiten werden mit Vollkostenansätzen (variable Maschinenkosten und Ansatz für Abnutzung und Zinsansatz) bewertet. Es wird davon ausgegangen, dass der Betrieb seine Maschinen an der Abschreibungsschwelle nutzt. Darüber hinaus wird hier für die eingesetzte Arbeit ein Stundensatz von 17,50 € unterstellt.

Der Deckungsbeitrag ist eine in der Teilkostenrechnung etablierte Kennzahl. Er errechnet sich für jedes Produktionsverfahren als Differenz aus den in Geld gemessenen

Erträgen und den Aufwendungen für die variablen Produktionsfaktoren. Im Gegensatz zu einer Betrachtung auf Basis der direktkostenfreien Leistung werden hier auch die variablen Maschinenkosten sowie ein Zinsanspruch berücksichtigt.

Bei der Berechnung wird ein umsatzsteuerlich pauschalierender Betrieb unterstellt. Dieses entspricht der Mehrzahl der landwirtschaftlichen Betriebe.

Im Folgenden wird beispielhaft für die Schadensauswirkung an den landwirtschaftlichen Kulturen die Betroffenheit von Winterweizen auf Marsch- (Ertragsklasse „hoch“) und Geeststandorten (Ertragsklasse „niedrig“) abgebildet. Die betriebswirtschaftlichen Berechnungen wurden von Hilmar Gerdes, Landwirtschaftskammer Niedersachsen, durchgeführt.

Tabelle 15: Schadensberechnung Winterweizen (Szenario 1).

Positionen	Marschstandort, Ertragsklasse „hoch“ (90 dt/ha); €/ha	Geeststandort, Ertragsklasse „niedrig“ (70 dt/ha); €/ha
Verkaufserlös	1.690,28	1.326,56
eingesparte Düngemittel (80 %)	-366,77	-326,29
eingesparte Pflanzenschutzmittel (80 %)	-135,91	-97,07
eingesparte variable Maschinenkosten (45 %)	-102,22	-96,57
eingesparte Arbeitszeit (35 %)	-47,25	-44,10
Marsch: Gipsdüngemittel (15 dt/ha)	330,00	325,30
Geest: Superphosphat (7.5 dt/ha)		
Maschinenkosten „Düngerausbringung“	7,40	7,40
Grabenräumung, Drainagereinigung	50,00	50,00
Bodenuntersuchung (Salzgehalt und Nährstoffe)	60,28	60,28
Schaden im Szenario 1	1.485,81	1.205,51

In Tab. 15 ist die Herleitung des Schadens für Winterweizen im Jahr der Überflutung dargestellt. Im Mittel der Jahre 2009 bis 2011 wird ein durchschnittlicher Verkaufserlös von 1.690,28 €/ha (Marsch) bzw. 1.326,56 €/ha (Geest) angenommen. Durch die Überflutung wird dieser Verkaufserlös nicht erzielt und geht daher als Schaden in die Berechnung ein. Da der Zeitpunkt für die Überflutung während des Winters angenommen wird, werden bei der Bewirtschaftung die Aufwendungen für Dünge- und Pflanzenschutzmittel sowie für Maschinenkosten und Arbeitszeit eingespart. Die angegebene prozentuale Reduzierung bezieht sich auf den Gesamtaufwand für das Vegetationsjahr. Diese eingesparten Positionen werden schadensmindernd berücksichtigt.

Nach dem Überflutungsereignis ist für die Verbesserung der Bodenstruktur und der Pflanzenversorgung eine Gabe von 15 dt/ha Gipsdüngemittel (Marsch) bzw. 7.5 dt/ha Superphosphat (Geest) erforderlich. Die entsprechenden Kosten werden zusammen mit den dafür notwendigen Maschinenkosten ausgewiesen. Ebenso erfordert das Überflutungsereignis die Grabenräumung sowie das Spülen der Drainsysteme. Dafür werden pauschal 50 €/ha in Ansatz gebracht. Zusätzlich sind Bodenuntersuchungen auf Salzgehalte und Grundnährstoffe notwendig. Insgesamt ergibt sich im ersten Szenario für die Kultur Winterweizen ein Schaden im Überflutungsjahr von 1.485,81 €/ha (Marsch) bzw. 1.205,51 €/ha (Geest).

In Tab. 16 wird zusätzlich zum Schaden aus Szenario 1 noch ein weiterer Ertragsrückgang im Folgejahr von 25 % auf den weniger wasserdurchlässigen Marschstandorten für das zweite Szenario erwartet, sodass das Schadenspotential für die Marschstandorte auf 1.908,38 €/ha steigt. Für die durchlässigen Geeststandorte wird im Folgejahr kein Ertragsausfall für das zweite Szenario angenommen. Für die Geeststandorte sind die Schadenshöhen beider Szenarien daher identisch.

Tabelle 16: Schadensberechnung Winterweizen (Szenario 2).

	Marschstandort, Ertragsklasse „hoch“ (90 dt/ha); €/ha	Geeststandort, Ertragsklasse „niedrig“ (70 dt/ha); €/ha
Schaden im Szenario 1	1.485,81 €/ha	1.205,51 €/ha
25 % Minderertrag im Folgejahr	422,57 €/ha	kein Ertragsausfall
Schaden im Szenario 2	1.908,38 €/ha	1.205,51 €/ha (s. Szenario 1)

Diese Schadensberechnungen wurden für alle maßgeblichen Kulturen durchgeführt. Das Ergebnis dieser Berechnungen ist in Tab. 17 dargestellt.

Tabelle 17: Kulturspezifische Schadenshöhen.

Kultur	Ertragsklasse	kulturspezifische Schadenshöhe (€/ha)	
		Szenario 1	Szenario 2
Grünland (Mähweide, 2 Schnitte)	hoch (54 GJ NEL/ha)	887,19	1.118,13
	niedrig (51,5 GJ NEL/ha)	868,71	1.088,95
Ackergras (Mischung A1, 5 Schnitte)	hoch (100 GJ NEL/ha)	1.126,54	1.554,21
	niedrig (90 GJ NEL/ha)	950,22	1.335,12
Winterweizen	hoch (90 dt/ha)	1.485,81	1.908,38
	niedrig (70 dt/ha)	1.205,51	1.537,14
Wintergerste	hoch (90 dt/ha)	1.309,08	1.665,75
	niedrig (70 dt/ha)	1.035,04	1.312,46
Sommergerste	hoch (80 dt/ha)	923,79	1.263,63
	niedrig (60 dt/ha)	800,11	1.091,40
Winterraps	hoch (40 dt/ha)	1.378,00	1.768,47
	niedrig (30 dt/ha)	1.002,03	1.294,89
Silomais (Biogas)	hoch (550 dt/ha)	1.361,27	1.843,28
	niedrig (500 dt/ha)	1.216,15	1.654,34
Speisekartoffeln	hoch (500 dt/ha)	5.973,85	8.017,61
	niedrig (400 dt/ha)	4.558,54	6.193,55
Zuckerrüben	hoch (700 dt/ha)	1.593,76	2.291,40
	niedrig (550 dt/ha)	1.109,14	1.657,29
Ackerbohnen	hoch (50 dt/ha)	749,80	1.022,35
	niedrig (40 dt/ha)	564,51	785,34

Bei den Schadensermittlungen sind insbesondere die jährlich stark schwankenden Preise z. B. bei den Verkaufserlösen oder auch bei den Betriebsmitteln wie Dünge- und Pflanzenschutzmittel zu berücksichtigen. So bewegte sich der Verkaufserlös für Silomais (Geeststandort, Ertragsniveau 500 dt/ha) in den Jahren 2009 bis 2011 zwischen ~1.380 und ~2.130 €/ha. Der Deckungsbeitrag schwankte im gleichen Zeitraum sogar von ~360

bis ~1.200 €/ha. Noch drastischer fällt der Vergleich bei Winterweizen aus (Marschstandort, Ertragsniveau 90 dt/ha): Während sich die Verkaufserlöse in den Jahren 2009 bis 2011 zwischen ~1.220 und 2.050 €/ha bewegten, schwankte der Deckungsbeitrag im gleichen Zeitraum von ~120 bis ~1.090 €/ha.

Hinsichtlich der Überstaudauer wird ein Zeitraum von annähernd einer Woche angenommen. Die Überstaudauer kann in Abhängigkeit der örtlichen Situation beträchtlich variieren (topografische Lage, Überstauhöhe, Abfluss- und Entwässerungssituation, Zustand der Gräben, Vorhandensein und Funktion der Schöpfwerke, Zustand der Deiche, nachfolgende Hochwasserstände u. v. m.).

Der Salzgehalt des Überschwemmungswassers ist abhängig von der Region (Nordsee oder Ostsee) und wird stark vom Grad der Aussüßung im Hinterland beeinflusst (Vermischung mit z. B. Flusswasser). Für die Szenarien werden maximale Salzgehalte von ~35 ‰ (Nordsee) angesetzt. Diese entsprechen einer elektrischen Leitfähigkeit im Wasser (= EC_w) von 55 mS/cm (Nordsee). Unter Berücksichtigung eines Konzentrationsfaktors von 0,8 nach Tab. 7 ergeben sich für die elektrische Leitfähigkeit im Bodensättigungsextrakt (= EC_e) Werte in Höhe von 44 mS/cm (Nordsee) bzw. 18 mS/cm (Deutsche Ostseeküste).

Entscheidend für die Salzbefruchtung der Flächen und damit für den Strukturzerfall tonreicher Böden sowie für die Pflanzenschädigung ist neben Überstaudauer und Salzgehalt des Wassers die vertikale Eindringtiefe in das Bodenprofil. Eine Vorsättigung der Böden durch vorhergegangene Niederschläge, der Bearbeitungszustand der Krume (z. B. Maisstoppel oder Pflugfurche) und die bodenartige Profilschichtung (z. B. Tone oder Sande bzw. Marsch oder Geest) beeinflussen maßgeblich die Eindringtiefe. Ebenso sind die Höhe und Verteilung nachfolgender Niederschläge (Auswaschungsgeschwindigkeit) sowie das Ausmaß der Evapotranspiration (kapillarer Wiederaufstieg salzhaltigen Bodenswassers und Wiederversalzung) wichtige Einflussgrößen für das Ausmaß der Schädigung. Zu all den genannten Faktoren können keine differenzierten Annahmen getroffen werden. Ebenso wird nicht hinsichtlich der Schädigungseffekte unterschieden, obwohl die Schädigung der Kulturen primär durch den NaCl-Gehalt erfolgt. Der Sauerstoffmangel infolge Überstau ist lediglich als sekundärer Effekt zu werten, da sich die Kulturen zwischen November und Februar in einer relativ stoffwechsel-inaktiven Phase befinden (Winterruhe, nur begrenztes Wachstum).

4.4.1 Szenario 1: Ertraglicher Totalausfall im ersten Jahr

Grundsätzlich erstreckt sich der Betrachtungszeitraum für das erste Szenario lediglich über ein Jahr. Im zweiten Jahr werden keine Ertragsausfälle angenommen.

Für das Szenario 1 wird eine Schädigung aller Kulturen zu 100 % auf allen Flächen angesetzt (Totalausfall, keine Nutzung im ersten Jahr). Von den überfluteten Winterungen (Wintergetreide, Wintererbsen) können im ersten Jahr keine Ernten eingefahren werden. Das betroffene Ackergras sowie das Grünland lässt keine Schnittnutzung oder Beweidung zu und muss zu 50 % neu angesät werden. Eine Frühjahrsaussaat bzw. -bestellung von Sommerungen wie Sommergetreide, Mais, Kartoffeln, Rüben, Leguminosen und Gemüse ist nicht möglich. Der Anbau der Folgefrüchte kann im ersten Jahr frühestens erst im Spätsommer/Herbst (Wintererbsen, Wintergetreide) bzw. im nächsten Frühjahr des zweiten Jahres erfolgen (Sommergetreide, Mais, Kartoffeln, Rüben, Leguminosen und

Gemüse). Generell sind Bodenuntersuchungen (Grundnährstoffe, pH, Salzgehalte) sowie Meliorationsmaßnahmen erforderlich (Grabenräumung, Spülung der Drainsysteme, Düngung mit Gips bzw. Superphosphat).

4.4.2 Szenario 2: Ertraglicher Totalausfall im ersten Jahr sowie Teilausfall im Folgejahr auf den undurchlässigeren Standorten

Für das zweite Szenario gelten die Bedingungen wie in Szenario 1. Allerdings erstreckt sich der Betrachtungszeitraum für das zweite Szenario über zwei Jahre. Erst im dritten Jahr treten keine Ertragsausfälle auf.

Zusätzlich wird angenommen, dass in Szenario 2 im Gegensatz zum ersten Szenario in allen Projektgebieten der Flächenanteil, der im zweiten Jahr für den Anbau von Sommergetreide vorgesehen war, im Herbst des ersten Jahres mit Wintergetreide bestellt wird (Substitution des Sommergetreides durch Wintergetreide).

Zudem werden im zweiten Szenario die unterschiedlichen Standortqualitäten hinsichtlich ihrer Entsalzungsgeschwindigkeit berücksichtigt. Zusätzlich zu den Totalausfällen in allen Kulturen auf allen Flächen im ersten Jahr (siehe Szenario 1) wird für die Marschstandorte der Projektgebiete Norden und Pellworm sowie für die Marsch/Moor-Standorte im Projektgebiet Norden angenommen. Dagegen gilt für die Geest- und Geest/Moor-Standorte im Projektgebiet Norden die Annahme, dass aufgrund der erhöhten Durchlässigkeit im zweiten Jahr keine Ertragsausfälle zu erwarten sind.

4.5 Projektgebiet Norden: Marschstandorte/Ertragsklasse „hoch“

4.5.1 Szenario 1

Nachdem für jede Kultur die Berechnung der spezifischen Schadenshöhe in Abhängigkeit von der Ertragsgüte des Standortes und von dem Szenario durchgeführt wurde (Tab. 17), erfolgt entsprechend den standörtlichen Anbauverhältnissen eine Gewichtung der Schadenshöhe ackergenutzter Flächen (Tab. 18). Dieses führt zu einem durchschnittlichen Schaden auf Ackerflächen in Höhe von 1.380 €/ha. Die Schadenshöhe für Grünland entspricht dem Ergebnis aus Tab. 17 und beträgt 887 €/ha.

Tabelle 18: Nutzungsdifferenzierte Schadenshöhe (Norden, Marschstandorte, Ertragsklasse „hoch“, Szenario 1).

Kulturen	Anbauverhältnis (%)	Schadenshöhe Ackerkultur (€/ha)	gewichteter Schaden Ackernutzung (€/ha)
Wintergetreide (Winterweizen)	66	1.486	1.380
Winterraps	12	1.378	
Silomais	10	1.361	
Sommergetreide (Sommergerste)	3	924	
Ackergras	6	1.127	
Schadenshöhe Grünland (€/ha)			887

Mit Berücksichtigung des Grünland- und Ackeranteils erfolgt unter Verwendung der Schadenshöhen aus Tab. 18 die Ermittlung des durchschnittlichen Schadenspotentials für landwirtschaftlich genutzte Flächen am jeweiligen Standort (hier: 1.188 €/ha, siehe gewichteter Schaden Acker/Grünland; Tab. 19). Dessen Multiplikation mit der Fläche führt zum Gesamtschadenspotential in der jeweiligen Kulisse eines Projektgebietes (hier: ~28.3 Mio. €).

Tabelle 19: Durchschnittliche und Gesamtschadenshöhe (Norden, Marschstandorte, Ertragsklasse „hoch“, Szenario 1).

Acker-, Grünlandanteil (%)	61/39
gewichteter Schaden Acker/Grünland im Szenario 1 (€/ha)	1.188
Fläche (ha)	23.800
Gesamtschaden Szenario 1 (€)	28.262.704

4.5.2 Szenario 2

Zum Vergleich der Szenarien ist in Tab. 20 das Ergebnis der Berechnungen für das Szenario 2 dargestellt. Die Unterschiede resultieren aus der Annahme, dass zum Totalausfall im ersten Jahr zusätzlich noch 25 % Ertragsausfall im Folgejahr auf Marschstandorten auftreten. Zudem wurde Sommergerste durch Winterweizen substituiert.

Tabelle 20: Nutzungsdifferenzierte Schadenshöhe (Norden, Marschstandorte, Ertragsklasse „hoch“, Szenario 2).

Kulturen	Anbauverhältnis (%)	Schaden je Ackerkultur (€/ha)	gewichteter Schaden Acker-nutzung (€/ha)
Wintergetreide (Winterweizen)	69	1.908	1.809
Winterraps	12	1.768	
Silomais	10	1.843	
Sommergetreide (Sommergerste)	0	1.264	
Ackergras	6	1.554	
Schadenshöhe Grünland (€/ha)			1.118

Bei einem Grünland- und Ackeranteil von 61 bzw. 39 % (Tab. 21) führt ein Schaden von 1.809 €/ha auf Ackerflächen und 1.118 €/ha auf Grünland (Tab. 20) zu einer durchschnittlichen Schadenshöhe von 1.540 €/ha. Für die Marschstandorte mit einer Fläche von 23.800 ha ergibt sich somit im Szenario 2 ein Gesamtschadenspotential von ~36.6 Mio. € (Tab. 21).

Tabelle 21: Durchschnittliche und Gesamtschadenshöhe (Norden, Marschstandorte, Ertragsklasse „hoch“, Szenario 2).

Acker-, Grünlandanteil (%)	61/39
gewichteter Schaden Acker/Grünland im Szenario 2 (€/ha)	1.540
Fläche (ha)	23.800
Gesamtschaden Szenario 2 (€)	36.648.235

4.6 Projektgebiet Norden: Geeststandorte/Ertragsklasse „niedrig“

Im Gegensatz zu den Marschen weisen die Geeststandorte ein geringeres Ertragspotential auf (Ertragsklasse „niedrig“). Zudem bestehen Unterschiede hinsichtlich der Anbauverhältnisse. Beide Faktoren beeinflussen maßgeblich die Höhe der Schadenspotentiale.

Ein weiterer Unterschied zu den Marschen besteht darin, dass auf den durchlässigeren Geeststandorten für das zweite Jahr keine Ertragsausfälle angenommen werden. In diesem Fall ist die Schadenshöhe in beiden Szenarien identisch.

Szenario 1 und Szenario 2

Nach Berechnung der kulturspezifischen Schadenshöhe in Abhängigkeit von der Ertragsgüte des Standortes und von dem Szenario (Tab. 17) wurde entsprechend den standörtlichen Anbauverhältnissen eine Gewichtung der Schadenshöhe ackergenutzter Flächen vorgenommen (Tab. 22). Das Ergebnis weist für Ackerflächen einen durchschnittlichen Schaden in Höhe von 1.117 €/ha aus und beträgt für Grünland 869 €/ha.

Tabelle 22: Nutzungsdifferenzierte Schadenshöhe (Norden, Geeststandorte, Ertragsklasse „niedrig“, Szenario 1).

Kulturen	Anbauverhältnis (%)	Schadenshöhe Ackerkultur (€/ha)	gewichteter Schaden Ackernutzung (€/ha)
Wintergetreide (Wintergerste)	23	1.035	1.117
Silomais	66	1.216	
Sommergetreide (Sommergerste)	6	800	
Ackergras	3	950	
Schadenshöhe Grünland (€/ha)			869

Mit Berücksichtigung des Grünland- und Ackeranteils erfolgt unter Verwendung der Schadenshöhen aus Tab. 22 die Ermittlung des durchschnittlichen Schadenspotentials für landwirtschaftlich genutzte Flächen am jeweiligen Standort (hier: 993 €/ha, s. gewichteter Schaden Acker/Grünland; Tab. 23). Dessen Multiplikation mit der Fläche führt zum Gesamtschadenspotential in der jeweiligen Kulisse eines Projektgebietes (hier: ~10.7 Mio. €).

Tabelle 23: Durchschnittliche und Gesamtschadenshöhe (Norden, Geeststandorte, Ertragsklasse „niedrig“, Szenario 1).

Acker-, Grünlandanteil (%)	50/50
gewichteter Schaden Acker/Grünland im Szenario 1 (€/ha)	993
Fläche (ha)	10.800
Gesamtschaden Szenario 1 (€)	10.724.049

5 Gesamtdarstellung der Schadenspotentiale in den Projektgebieten

5.1 Schadenspotentiale im Projektgebiet Norden

In Tab. 24 sind die Schadenspotentiale der jeweiligen Standorte für die unterschiedlichen Nutzungen und Szenarien im Projektgebiet Norden aufgeführt.

Tabelle 24: Schadenspotentiale Projektgebiet Norden.

Standort/ Ertragsklasse *	Nutzung	Fläche (ha)	Anteil (%)	Schadenspotential			
				Szenario 1		Szenario 2	
				€/ha	Gesamt (€)	€/ha	Gesamt (€)
Marsch/ „hoch“	Acker	14.518	61	1.380	20.027.853	1.809	26.269.798
	Grünland	9.282	39	887	8.234.851	1.118	10.378.436
	Gesamt	23.800	100	1.188	28.262.704	1.540	36.648.235
Marsch_Moor/ „hoch“	Acker	703	38	1.340	941.743	1.789	1.257.484
	Grünland	1.147	62	887	1.017.601	1.118	1.282.489
	Gesamt	1.850	100	1.059	1.959.344	1.373	2.539.973
Geest/ „niedrig“	Acker	5.400	50	1.117	6.033.042	1.117	6.033.042
	Grünland	5.400	50	869	4.691.007	869	4.691.007
	Gesamt	10.800	100	993	10.724.049	993	10.724.049
Geest_Moor/ „niedrig“	Acker	602	47	1.102	662.768	1.102	662.768
	Grünland	678	53	869	589.329	869	589.329
	Gesamt	1.280	100	978	1.252.097	978	1.252.097
Projektgebiet Norden Gesamt **		37.730	A: 57 % G: 43 %	1.118	42.198.194	1.356	51.164.354

* Standorte/Ertragsklasse: Zuordnung s. Kapitel 4.1; ** A: Acker, G: Grünland; grau hinterlegte Zahlen wurden für die Kartendarstellungen verwendet (= geografische Zuordnung der Schadenspotentiale).

Da für die niedersächsischen Projektgebiete im Gegensatz zu den schleswig-holsteinischen Betrachtungsräumen (Feldblockebene) die jeweilige Flächennutzung auf Schlagebene geografisch verortet vorliegt, können die ermittelten Schadensbeträge anschließend im GIS detailliert den tatsächlich als Acker bzw. als Grünland genutzten Flächen zugewiesen und das Ergebnis als Karte dargestellt werden.

In Abb. 8 sind die Schadenspotentiale im Szenario 1 für das Projektgebiet Norden dargestellt. Die Schadenshöhen auf den Grünlandstandorten bewegen sich zwischen 869 €/ha (Geest, Geest/Moor) und 887 €/ha (Marsch, Marsch/Moor). Dagegen fallen die Schadenspotentiale auf den als Acker genutzten Flächen mit 1.102 €/ha (Geest/Moor) bis 1.380 €/ha (Marsch) entsprechend höher aus. Insgesamt ergibt sich unter Berücksichtigung der Anbauverhältnisse für landwirtschaftlich genutzte Flächen im ersten Szenario ein durchschnittliches Schadenspotential in Höhe von 1.118 €/ha (s. a. Tab. 24).

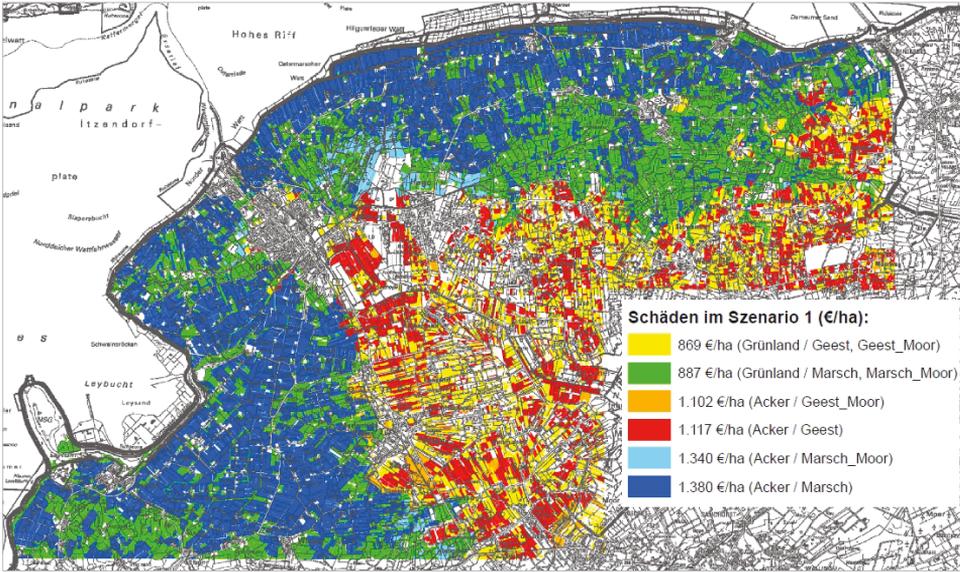


Abbildung 8: Schadenspotentiale im Projektgebiet Norden (Szenario 1).

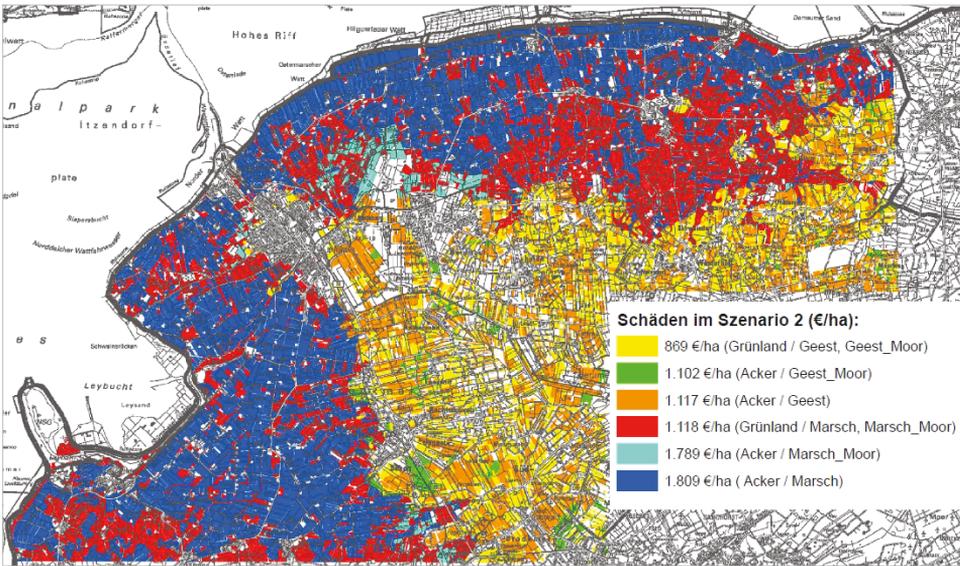


Abbildung 9: Schadenspotentiale im Projektgebiet Norden (Szenario 2).

Die Schadenspotentiale für das zweite Szenario enthält Abb. 9. Die untere Schadensgrenze entspricht der aus dem ersten Szenario, da auf den Geeststandorten für das zweite Jahr keine Ertragsausfälle angenommen werden. Sie beträgt für Grünlandflächen 869 €/ha (Geest, Geest/Moor). Das Schadenspotential für Grünlandflächen in den Standortklassen Marsch sowie Marsch/Moor fällt aufgrund des für diese Standorte im zweiten Jahr angenommenen zusätzlichen Ertragsausfalls von 25 % mit 1.118 €/ha höher aus als im ersten

Szenario. Entsprechend bewegen sich die Schadenshöhen für Ackerflächen zwischen 1.102 € (Geest/Moor) und 1.809 €/ha (Marsch). Unter Berücksichtigung der Anbauverhältnisse ergibt sich im zweiten Szenario eine durchschnittliche Schadenshöhe für landwirtschaftlich genutzte Flächen in Höhe von 1.356 €/ha.

5.2 Schadenspotentiale im Projektgebiet Pellworm

Das Projektgebiet Pellworm weist nur Marschflächen mit hohem Ertragspotential auf. Für alle Flächen wird aufgrund der relativ schwer durchlässigen Standorte für das zweite Szenario ein Ertragsausfall von 25 % im zweiten Anbaujahr angenommen. Die Schadenspotentiale schwanken im ersten Szenario von 887 €/ha bei Grünlandnutzung bis zu 1.284 €/ha bei Ackernutzung. Im zweiten Szenario liegen die Beträge zwischen 1.118 €/ha (Grünland) und 1.793 €/ha (Acker). Insgesamt beträgt das durchschnittliche Schadenspotential für das Projektgebiet Pellworm im ersten Szenario 1.087 €/ha bzw. 1.457 €/ha im zweiten Szenario (Tab. 25).

Tabelle 25: Schadenspotentiale Projektgebiet Pellworm.

Standort/Ertragsklasse*	Nutzung	Fläche (ha)	Anteil (%)	Schadenspotential			
				Szenario 1		Szenario 2	
				€/ha	Gesamt (€)	€/ha	Gesamt (€)
Kalkmarsch/„hoch“	Acker	158	72	1.280	202.701	1.793	283.962
	Grünland	62	28	887	54.651	1.118	68.877
	Gesamt	220	100	1.170	257.351	1.604	352.838
Klei-, Dwogmarsch/„höch“	Acker	1.004	52	1.284	1.288.918	1.775	1.781.027
	Grünland	926	48	887	821.888	1.118	1.035.831
	Gesamt	1.930	100	1.094	2.110.806	1.460	2.816.858
Knick-, Dwogmarsch/„höch“	Acker	248	45	1.209	299.221	1.718	425.159
	Grünland	303	55	887	268.373	1.118	338.233
	Gesamt	550	100	1.032	567.594	1.388	763.392
Projektgebiet Pellworm Gesamt **		2.700	A: 53 % G: 47 %	1.087	2.935.752	1.457	3.933.087

* Standorte/Ertragsklasse: Zuordnung s. Kapitel 4.1; ** A: Acker, G: Grünland; grau hinterlegte Zahlen wurden für die Kartendarstellungen verwendet (= geografische Zuordnung der Schadenspotentiale).

Für die kartografische Darstellung der Schadenspotentiale (Abb. 10) wurden die grau hinterlegten Durchschnittsbeträge aus Tab. 25 herangezogen, da für Pellworm keine schlagbezogenen, sondern nur feldblockbezogene Nutzungsdaten vorlagen.

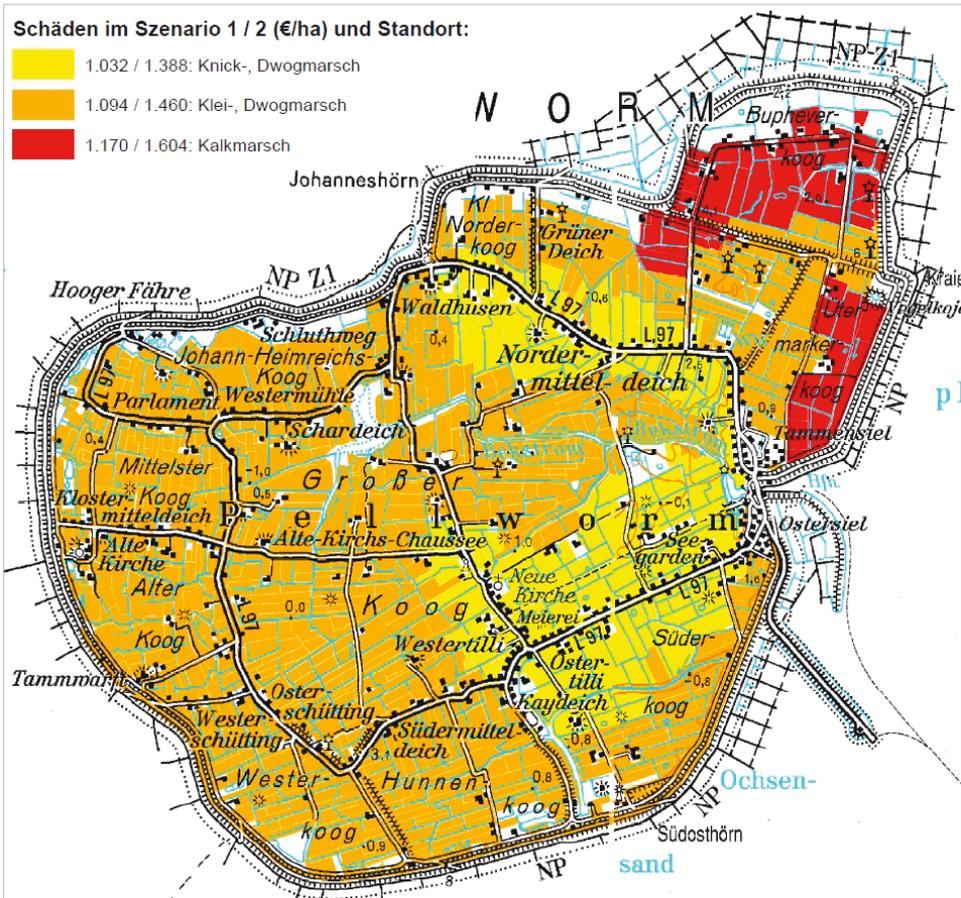


Abbildung 10: Schadenspotentiale Projektgebiet Pellworm.

6 Fazit

Nach einem historischen Rückblick auf Überschwemmungsereignisse des letzten Jahrhunderts wurden die Folgen des Salzwassereinflusses auf Pflanzen sowie auf Böden dargestellt und Kriterien für das Ausmaß deren Schädigung aufgezeigt. Besonders die praktischen Erfahrungen aus den Überschwemmungen des Ülvesbüller Kooges im Jahr 1962 und der Kehdinger Marsch im Jahr 1976 führten unter Beachtung kulturartenspezifischer Salztoleranzen und bodenkundlicher Überlegungen zu Entsalzungsgeschwindigkeiten zu Annahmen, die die Grundlagen für zwei Szenarien bildeten.

Nach der Überflutung im Zeitraum November bis Februar wurde für das erste Szenario angenommen, dass im ersten Jahr unabhängig von der Wasserdurchlässigkeit der Standorte ein Totalausfall bei sämtlichen Kulturen zu erwarten ist. Dagegen bestand für das zweite Szenario die Annahme, dass zusätzlich zum Totalausfall im ersten Jahr ein Ertragsausfall in Höhe von 25 % bei allen Kulturen auf den weniger wasserdurchlässigen

Standorten eintreten wird, während auf den durchlässigen Sandstandorten im zweiten Szenario kein Ausfall zu beklagen ist.

Die Ermittlung der kulturspezifischen Schadenshöhen erfolgte nach den Grundsätzen der Deckungsbeitragsrechnung und berücksichtigte zwei standortabhängige Ertragsklassen. Unter Verwendung von Daten aus dem landwirtschaftlichen Flächenkataster sowie unter Beachtung bodenkundlicher Standortinformationen wurden anschließend die Schadenspotentiale für beide Szenarien berechnet.

Die ermittelten Schadenspotentiale berücksichtigen

- die standörtlichen Unterschiede aufgrund bodenkundlicher Daten,
- die Schadenshöhen der jeweiligen Kultur je nach Ertragsklasse,
- die Fruchtfolgen auf den Ackerstandorten und deren Anbauverhältnis,
- den Grünland- und Ackerflächenanteil sowie
- das jeweilige Szenario.

Zu beachten ist, dass aufgrund der unterschiedlichen Datenlage im Gegensatz zu den schlagbezogenen Angaben in Niedersachsen, die Angaben für die schleswig-holsteinischen Gebiete flächenunschärfer auf Feldblockebene erfolgen und daher für Schleswig-Holstein keine räumlichen Differenzierungen in Grünland- und Ackerflächen möglich sind. In diesem Fall sind - analog zu Niedersachsen - die Schadenspotentiale für Acker- und Grünlandnutzung kulturspezifisch berechnet worden, allerdings erfolgte dann anschließend im Unterschied zu Niedersachsen eine nach Grünland-Ackeranteil flächengewichtete Durchschnittsbildung bei den Schadenspotentialen.

Aufgrund der komplexen Zusammenhänge ergeben sich diverse Unsicherheiten hinsichtlich der den Szenarien zugrunde liegenden Annahmen. Diese Unsicherheiten beziehen sich u. a. auf:

- zu erwartende Salzgehalte im überstauenden Medium (Nordsee-, Ostseewasser, Verdünnungen über Flussläufe),
- sich in der Bodenlösung einstellende Salzgehalte (Ausgangswassergehalte, Niederschläge),
- Vorsättigung des Bodens (Eindringwiderstand, Verdünnung),
- Höhe und Verteilung der Niederschläge (Entsalzungsgeschwindigkeit),
- Temperaturverlauf, besonders während der Vegetationsperiode (Evapotranspiration, kapillare Nachlieferung salzhaltigen Wassers),
- Zustand/Leistung der Entwässerungssysteme (Gruppen, Dräne, Vorfluter, Schöpfwerke),
- Zeitpunkt und Dauer des Überstaus (Vegetationsstadium der Kulturen),
- Kationenaustauscherkapazität des Bodens (Bodenart, pH-Wert, Ionen-Belegung, Na-Sättigung) → Aggregatstabilität, Austauschervermögen,
- Versorgungsgrad des Bodens bzw. der Kulturen mit Hauptnährelementen (z. B. Kalium) und Kalkversorgung (pH-Wert),
- Bearbeitungszustand des Bodens vor Überflutung (unbearbeitet, Pflugbrache, bestellt),
- Strukturstabilität des Bodens vor Überstau (stabiles Krümelgefüge, Kohärentgefüge, Einzelkornggefüge),
- Tiefe des Grundwasserspiegels (Abfuhr salzhaltigen Wassers, Aufstieg Süßwasser),

- Kapillarität und Drainfähigkeit des Bodens (Auswaschung, Wiederaufstieg salzhaltigen Wassers, Aufstieg Süßwasser),
- Vorhandensein/Tiefenlage von Verdichtungshorizonten oder auch Torflagen → z. B. Knickmarschen, Podsole, Pseudogleye, Moore,
- tatsächliche Salztoleranz der unter humiden Bedingungen angebauten Kulturen,
- Schwankungen in den Anbauverhältnissen (Vorzüglichkeit der Kulturen) sowie
- Schwankungen bei den Kosten für Betriebsmittel sowie bei den Erzeugerpreisen.

Nicht auszuschließen ist, dass die tatsächlichen Schadenspotentiale von den ermittelten Schadenshöhen um ein Vielfaches abweichen können. Besonders hinsichtlich der Abschätzung möglicher Ertragsausfälle für die Folgejahre nach einer Überflutung mit Salzwasser bestehen weiterhin große Unsicherheiten, aus denen ein weiterer Forschungsbedarf abzuleiten ist.

7 Schriftenverzeichnis

Achtnich, W.: Bewässerungslandbau, 1980.

Ad-Hoc Arbeitsgruppe Boden: Bodenkundliche Kartieranleitung. 5. Auflage, Hannover, 2005.

Bergmann, M.: Berechnung des Salzgehaltes der Elbe. Wassergütestelle Elbe, 2005.

Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, BSH: Naturverhältnisse Ostsee. Teil B zu den Handbüchern für die Ostsee und das Kattegat, 2008.

Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, BSH: Naturverhältnisse Nordsee und Englischer Kanal, 2009.

Dadshani, S. A. W.: Untersuchungen zur genotypischen Salzresistenz von Gerste in semi-ariden Gebieten. Diplomarbeit. Universität Bonn, 2006.

DIN 19684-10:2009-01: Bodenbeschaffenheit – Chemische Laboruntersuchungen – Teil 10: Untersuchung und Beurteilung des Wassers bei Bewässerungsmaßnahmen. 2009.

DIN 19732:1997-06: Bestimmung des standörtlichen Verlagerungspotentials von nicht-sorbierbaren Stoffen. 1997.

FAO: Water Quality for Agriculture. FAO Irrigation and Drainage Papers 29 Rev.1. Rome, 1985.

FAO: Agricultural Drainage Water Management in Arid and Semi-Arid-Areas. FAO Irrigation and Drainage Papers 61. Rome, 2002.

Finck, A.: Pflanzenwachstum auf Salzböden. Aspekte der Physiologie und Düngung. Zeitschrift für Bewässerungswirtschaft, Heft 1, 47–62, 1975.

Finck, A.: Pflanzenernährung und Düngung in Stichworten. 6. Auflage, 2007.

Hannoversche Land- und Forstwirtschaftliche Zeitung: Deiche und Wiederaufbau haben Vorrang. Nr. 10, 10.03, 546, 1962a.

Hannoversche Land- und Forstwirtschaftliche Zeitung: Die Obstbauern ziehen Bilanz. Nr. 12, 24.03, 658, 1962b.

Hannoversche Land- und Forstwirtschaftliche Zeitung: Hat die Sturmflut die Grasnarbe geschädigt? Nr. 13, 31.03, 725–726, 1962c.

Hannoversche Land- und Forstwirtschaftliche Zeitung: Versalzung der überfluteten Böden. Nr. 14, 07.04, 781–782, 1962d.

- Hillel, D.: Salinity Management for Sustainable Irrigation. Integrating Science, Environment and Economics. The World Bank Washington, D. C., 2000.
- Keskin, B.: Ackerbaulich genutzte Böden in der West-Türkei: Probleme der Bodenversalzung bzw. -alkalisierung. Dissertation. Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, 2005.
- Klaghofer, E.: Hochwasser und Landnutzung. Schriftenreihe des Bundesamtes für Wasserwirtschaft, Österreich, V 275, 19, 60–69, 2003.
- Koyro, H. W.; Lieth, H.: Salinity conversion table. 2. Auflage, 1998.
- Kretschmar, R.: Kulturtechnisch-Bodenkundliches Praktikum. Institut für Wasserwirtschaft und Landschaftsökologie, Universität Kiel, 1989.
- KTBL, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V.: Betriebsplanung Landwirtschaft 2012/13. Daten für die Betriebsplanung in der Landwirtschaft. 23. Auflage, Darmstadt, 2012.
- Kuntze, H.; Roeschmann, G.; Schwerdtfeger, G.: Bodenkunde. 4. Auflage, 1988.
- LBEG – Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, LBEG: Grundwasserneubildung in Niedersachsen. Geoberichte 10. Hannover, 2008.
- LBEG – Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, LBEG: Auswertungsmethoden Bodenschutz. Geoberichte 19. Hannover, 2011.
- Landwirtschaftskammer Niedersachsen: Richtwert-Deckungsbeiträge 2009, Oldenburg, 2010.
- Landwirtschaftskammer Niedersachsen: Richtwert-Deckungsbeiträge 2010, Oldenburg, 2011.
- Landwirtschaftskammer Niedersachsen: Richtwert-Deckungsbeiträge 2011, Oldenburg, 2012.
- Landwirtschaftsblatt Weser-Ems: Schwere Wasser- und Sturmflutschäden auch in Weser-Ems. Nr. 8, 22.02.1962, S. 347, 1962a.
- Landwirtschaftsblatt Weser-Ems: Boden- und Pflanzenschäden durch Meerwasser, 398–399, 1962b.
- Landwirtschaftsblatt Weser-Ems: Versalzung des Bodens durch Überflutung mit Meerwasser, 566–567, 1962c.
- Landwirtschaftsblatt Weser-Ems: Starke Versalzung der überfluteten Polder, 456–457, 1962d.
- Landwirtschaftsblatt Weser-Ems: Stand der Bodenversalzung in den überfluteten Poldern, 774–775, 1962e.
- Läuchli, A.; Lüttge, U.: Salinity: Environment – Plants – Molecules. Springer, 2002.
- Lecher, K.; Lühr, H. P.; Zanke, C. E. (Hrsg.): Taschenbuch der Wasserwirtschaft, 8. Auflage, 2001.
- Maas, E. V.: Testing Crops for Salinity Tolerance. Proceedings of Workshop on Adaption of Plants to Soil Stresses. In: Maranville, J. W.; Baligar, B. V.; Duncan, R. R.; Yohe, J. M. (eds.): INTSORMIL, 94-2, University of Nebraska, Lincoln, NE, 234–247, 1993.
- MinHorLam: Minderung von Hochwasserrisiken durch nicht-strukturelle Landnutzungsmaßnahmen in Abflussbildungs- und Überschwemmungsgebieten. Anlage B1 zum Ergebnisbericht des BMBF-Forschungsprojektes MinHorLam, 2010.

- Molen, van der W. H.: The exchangeable Cations in Soils flooded with Seawater. De inundaties gedurende 1944–45 en hun gevolgen voor de Landbouw. Deel 9. Versl. Landbouwk. Onderz., 63 (17), 1957.
- Munns, R.; Husain, S.; Rivelli, A. R.; James, R. A.; Condon, A. G.; Lindsay, M. P.; Lagudah, E. S.; Schachtman, D. P.; Hare, R. A.: Avenues for increasing salt tolerance of crops and the role of physiologically based selection traits. *Plant and Soil*, 247, 93–105, 2002.
- NMELF – Niedersächsisches Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten: Die Sturmflut vom 16./17. Februar 1962 im niedersächsischen Küstengebiet. *Die Küste*, 10 (1), 1962.
- NLB – Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung, Nlfb: Führer zu den Feldversuchen, 4. Auflage, 1980.
- Pessarakli: Handbook of Plant and Crop Stress. 2. Auflage, 1999.
- Richards, L. A. (Hrsg.): Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. US Department of Agriculture, Agriculture Handbook, 60, 1954.
- Robinson, M. F.; Very, A. A.; Sanders, D.; Mansfield, T. A.: How can stomata contribute to salt tolerance? *Annals of Botany*, 80, 387–393, 1997.
- Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft: Veränderte Landnutzungssysteme in hochwassergefährdeten Gebieten. Schriftenreihe der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft, 12 (10), 2005.
- Scheffer, F.; Schachtschabel, P.: Lehrbuch der Bodenkunde. 12. Auflage, 1989.
- Scheffer, F.; Schachtschabel, P.: Lehrbuch der Bodenkunde. 16. Auflage, 2010.
- Schleiff, U.: Salztoleranz von Kulturpflanzen unter ökologischen Bedingungen. *Zeitschrift für Bewässerungswirtschaft*, 1, 96–102, 1974a.
- Schleiff, U.: Untersuchungen über die Ursachen von Salzschäden an Kulturpflanzen. *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft*, 18, 284–290, 1974b.
- Schleiff, U.: Einfluss von Magnesium- und Natrium-Salinität auf die Mineralstoffversorgung von Mais und Weizen. *Kali-Briefe*. 8. Folge, 1–11, 1977.
- Staples, R. C.; Toenniessen, G. H.: Salinity tolerance in plants. Strategies for crop improvement. Wiley-Verlag, 1984.
- Voigt, H.: Über das Ausmaß der Bodenversalzung infolge der Sturmflut im Februar 1962. *Zeitschrift der deutschen geologischen Gesellschaft*, 116, 797–803, 1964.
- Widmoser, P. (Hrsg.): Übungen im Fach Wasserwirtschaft und Meliorationswesen. Institut für Wasserwirtschaft und Landschaftsökologie, Christian-Albrechts-Universität Kiel, 1992.
- Withers, B.; Vipond, S.; Lecher, K.: Bewässerung, 1978.
- Wohlenberg, E.: Der Deichbruch des Ülvesbüller Kooges in der Februar-Sturmflut 1962: Versalzung – Übersandung – Rekultivierung. *Die Küste* 11, 1963.
- Wohlenberg, E.: Die Leistung der Drains für Entsalzung und Oxydation in neu bedachten Kögen in Nordfriesland. *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft*, 2, 73–78, 1964.
- Zeng, L.; Shannon, M. C.; Grieve, C. M.: Evaluation of salt tolerance in rice genotypes by multiple agronomic parameters. *Euphytica* 127, 235–245, 2002.