



R. Fohrmann

Modellierung des Stickstoff- und Kohlenstoffhaushaltes unter landwirtschaftlichen Nutzflächen im Zeichen des Klimawandels

Verwendung eines DV-gestützten Simulationsmodells zur Unterstützung klimaangepasster Flächennutzungsverfahren

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



KLIMZUG

Klimawandel in Regionen



MODELLIERUNG DES STICKSTOFF-UND KOHLENSTOFFHAUSHALTES UNTER LANDWIRTSCHAFTLICHEN NUTZFLÄCHEN IM ZEICHEN DES KLIMAWANDELS

Verwendung eines DV-gestützten Simulationsmodells zur Unterstützung klimaangepasster Flächennutzungsverfahren

Reinhard Fohrmann

IWW Rheinisch-Westfälisches Institut für Wasserforschung gGmbH, Mülheim/Ruhr

dynaklim-Publikation Nr. 44



Abstract

Für das Trinkwassergewinnungsgebiet Üfter Mark im nordwestlichen Münsterland wurden mit Hilfe des Modells CANDY der Stoffaustrag sowie der Bodenwasserhaushalt unter landwirtschaftlichen Nutzflächen unter Klimawandelbedingungen modelliert. Am Beispiel einzelner Referenzflächen, für die Messwerte zum Stoffumsatz im Boden vorlagen, wurde das Modell an die standörtlichen Bedingungen angepasst. Die Modellläufe für verschiedene Fruchtfolgen und Standortbedingungen zeigten, dass - bei gleichbleibender Bewirtschaftung - allein durch die projizierten veränderten klimatischen Bedingungen ein erhöhter N-Austrag lediglich in Böden mit erhöhten Humusgehalten zu erwarten ist. Ein deutlicher Einfluss des Klimawandels auf erhöhte Bewässerungsansprüche (ca. 100 - 150 mm/a) in der Fernen Zukunft (2071 - 2100) zeichnete sich hingegen in allen betrachteten Fruchtfolgen und Standorttypen ab.

Die tatsächliche Entwicklung der landwirtschaftlichen Flächennutzung für die nächsten Jahrzehnte lässt sich auf Grund der vielfältigen Einflussfaktoren und ihrer komplexen Wechselwirkungen nicht belastbar prognostizieren.

Die Untersuchungsergebnisse haben jedoch gezeigt, dass durch den Einsatz eines DV-Systems wie CANDY zur Modellierung des Stoff- und Wasserhaushaltes eines Bodens - nach entsprechender Anpassung der Modellparameter an das Untersuchungsgebiet - bei sich abzeichnenden Änderungen der Bewirtschaftung deren Konsequenzen für den Stoffaustrag bzw. den Bodenwasserhaushalt modelliert werden. Durch Variierung der Bewirtschaftungsmaßnahmen kann der Modelleinsatz in der Folge die Entwicklung grundwasserschonende Flächennutzungsverfahren unterstützen.

Inhalt

1.	Einleitung.....	3
1.1	Modell-/Konzeptbeschreibung.....	3
2	Untersuchungsgebiet	4
2.1	Geografischer Überblick	4
2.2	Überblick Flächennutzung	5
2.3	Bodenkundliche Standortverhältnisse	5
2.4	Eckdaten der Wassergewinnung im Untersuchungsgebiet	8
2.5	Landwirtschaftliche Flächennutzung im Untersuchungsgebiet	9
2.6	Klima.....	12
3	Klimaprojektionen	13
4	Modellierung des Bodenstoff- und Wasserhaushaltes	14
4.1	Modellierung der Referenzflächen (2005 - 2009)	15
4.2	Modellergebnisse zum N-Haushalt für den Zeitraum 1961 - 2100.....	19
4.3	Modellergebnisse zum Bodenwasserhaushalt für den Zeitraum 1961 - 2100	22
5	Fazit und kritische Betrachtung der Modellergebnisse.....	24

1. Einleitung

Ziel des hier beschriebenen Forschungsvorhabens war es einerseits, die Auswirkungen veränderter klimatischer Bedingungen auf die landwirtschaftliche Flächennutzung zu erfassen und deren Konsequenzen für die qualitative und quantitative Entwicklung der Grundwasserbeschaffenheit in der Emscher-Lippe-Region zu beschreiben. Zentraler Kern der Untersuchungen war der Einsatz eines Modells zur Modellierung des Stickstoff- und Kohlenstoffhaushaltes unter landwirtschaftlichen Nutzflächen, um den Einfluss veränderter klimatischer Randbedingungen auf den Stoffaustrag zu quantifizieren und - sofern klimabedingte Änderungen festzustellen sind - an die veränderten Bedingungen angepasste Flächennutzungssysteme zu entwickeln, die zu einer Minimierung nachteiliger Grundwasserbeschaffenheitsänderungen führen. Die Untersuchungen wurden durchgeführt am Beispiel eines Trinkwassergewinnungsgebietes in der Emscher-Lippe-Region, des Wasserschutzgebietes Üfter Mark der RWW Rheinisch-Westfälische Wasserwerksgesellschaft mbH.

Das eingesetzte Modell war derart an die standörtlichen Bedingungen des Untersuchungsgebietes anzupassen, dass bei festgestellten nachteiligen Sickerwasserbeschaffenheitsänderungen durch Anpassung von Bewirtschaftungsvorgaben diese minimiert werden. Perspektivisch soll der Modelleinsatz somit sowohl zu einer Minimierung von Grundwasserbeschaffenheitsänderungen dienen als auch zur Unterstützung einer grundwasserschutzorientierten Landbewirtschaftung und in der Folge auch in weiteren Teilgebieten der Emscher-Lippe-Region oder darüber hinaus zur Anwendung kommen können.

1.1 Modell-/Konzeptbeschreibung

Zur Modellierung der Umsatz- und Transportprozesse im Boden wurde das Simulationsmodell CANDY (Version 2.1.2.1.106) verwendet. CANDY ist grundsätzlich als Freeware über die Homepage des UFZ Helmholtz Zentrum für Umweltforschung zu beziehen (<http://www.ufz.de/index.php?de=13152>), für die hier verwendeten Untersuchungen wurde eine aktuellere Version aus dem Jahr 2012 verwendet, die freundlicherweise von Herrn Dr. U. Franko, UFZ, zur Verfügung gestellt wurde.

Mit dem Modell CANDY (CARbon and Nitrogen DYnamics) wird die Dynamik des Kohlenstoff- und Stickstoffumsatzes im Boden sowie die Bodentemperatur und der Bodenwassergehalt als eindimensionaler Prozess für ein Bodenprofil in der ungesättigten Zone beschrieben, bevorzugt für Bodenprofile mit einem durchwurzelbaren Bereich bis zu 2 m Tiefe. Das betrachtete Bodenprofil wird hierzu in homogene Schichten von 1 dm Mächtigkeit unterteilt. Die Simulationsschritte erfolgen in Tagesschritten. Ausgehend von zu definierenden Startwerten bzw. im Modell vorgegebenen Variablen modelliert CANDY den Einfluss von Bewirtschaftungs- und Klimaeinflüssen auf die verschiedenen Ausgabeparameter bzw. u. a. auf folgende Prozesse:

- Bodenwasserhaushalt (potenzielle und aktuelle Evapotranspiration; Perkolation durch das Bodenprofil);
- Bodentemperatur-Dynamik;
- Stoffumsatz (Mineralisation und Humifizierung) organischer Substanz im Boden;
- Stickstoffdynamik (Mineralisation, Immobilisation, N-Aufnahme durch Pflanzen, N-Auswaschung bzw. Verlagerung, gasförmige N-Verluste; symbiotische N-Bindung).

Als Eingabedaten werden in CANDY insbesondere benötigt:

- Bodendaten (mindestens Angaben zu Lagerungsdichte, Substratdichte, Feldkapazität und Welkepunkt, Textur, gesättigte Leitfähigkeit);
- Klimadaten (Tagesdaten zu Lufttemperatur, Globalstrahlung, Niederschlag);
- Bewirtschaftungsdaten (Angaben zu angebaute Kulturen, Aussaat- und Erntetermine; Ernteerträge; Bodenbearbeitung und Beregnung; organische und mineralische Düngung).

In der Folge lassen sich mit CANDY ein Vielzahl von Parametern zur Beschreibung der-N- und Kohlenstoffdynamik sowie des Bodenwasserhaushaltes modellieren (siehe auch Franko et al. [1995]; CANDY User Manual [http://www.ufz.de/export/data/1/21035_candy_manual.pdf]).

Für die hier betrachtete Fragestellung war insbesondere von Interesse, welchen Einfluss veränderte Klimabedingungen bei gegebener Bewirtschaftung auf den Stoff- und Wasserhaushalt des Boden haben (insbesondere N-Auswaschung und Sickerwasserbildung) und - sofern hier klimabedingt nachteilige Entwicklungen festzustellen sind - mit welchen adaptierten Bewirtschaftungsmaßnahmen diese Auswirkungen zu minimieren sind.

Die weiteren qualitativen und quantitativen Auswirkungen auf die Grundwasserbeschaffenheit wurden im Rahmen von *dynaklim* in einem anderen Teilprojekt bearbeitet und die hier erarbeiteten Ergebnisse zur weiteren Verarbeitung an dieses Teilprojekt übergeben (siehe Kübeck et al. 2013).

2 Untersuchungsgebiet

Die Untersuchungen wurden durchgeführt am Beispiel des Wasserschutzgebietes Üfter Mark / Holsterhausen der RWW Rheinisch-Westfälische Wasserwerksgesellschaft mbH. In den Untersuchungen berücksichtigt wurde der nördliche Teil des Wasserschutzgebietes Holsterhausen / Üfter Mark im Einzugsbereich der Wassergewinnung Üfter Mark.

2.1 Geografischer Überblick

Das Wassergewinnungsgebiet Üfter Mark liegt innerhalb des *dynaklim*-Projektgebietes im südwestlichen Bereich des Münsterländer Beckens ca. 30 km nördlich von Oberhausen zwischen den Ortschaften Holsterhausen, Raesfeld und Heiden und ca. 2 km nördlich der Lippe. Es erstreckt sich über die drei Kreisgebiete Borken, Wesel und Recklinghausen. Das Gebiet wird über ein Gewässersystem aus Rhader Mühlenbach, Hammbach, Schafsbach und Schermbecker Mühlenbach entsprechend der Gebietsmorphologie von Norden nach Süden Richtung Lippe entwässert. Es umfasst innerhalb der in Abbildung 1 dargestellten Wasserschutzgebietsgrenzen eine Größe von ca. 105 km². Morphologisch ist das Untersuchungsgebiet durch die pleistozänen Kalt- und Warmzeiten geprägt und mit Höhendifferenzen von durchschnittlich 15 m im Relief nur schwach bewegt.

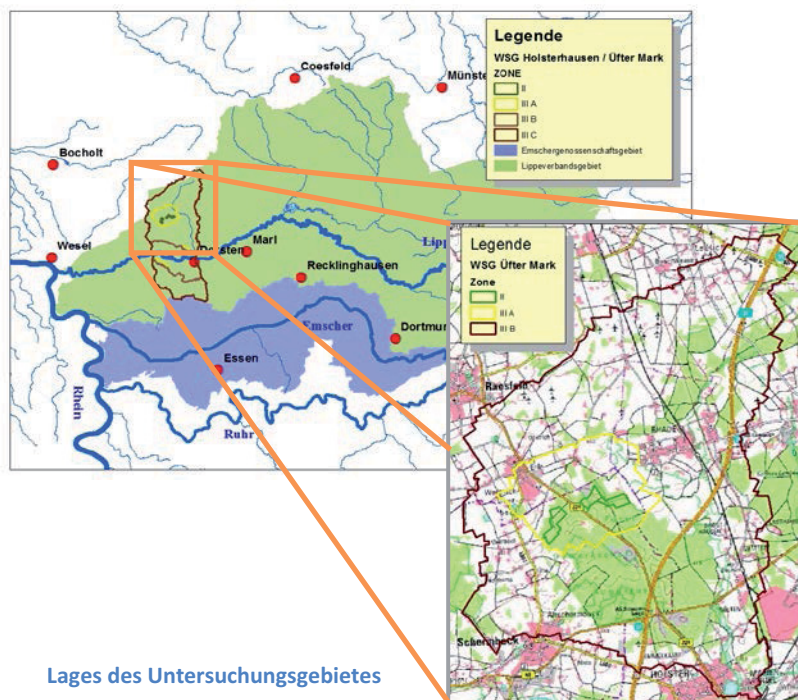


Abbildung 1: Lages des Untersuchungsgebietes

2.2 Überblick Flächennutzung

Das Gebiet ist überwiegend ländlich geprägt und wird entsprechend einer Auswertung der Corine Landcover-Daten 2006 (UBA, DLR-DFD 2009) zu ca. 68 % landwirtschaftlich und zu ca. 28 % forstwirtschaftlich genutzt. Lediglich ca. 4 % der Fläche werden weitestgehend durch Siedlungsbereiche genutzt. Industrielle Flächennutzungen spielen nur eine untergeordnete Rolle und beschränken sich auf die Weiterverarbeitung landwirtschaftlicher Produkte und die Gewinnung von Ton und Sand.

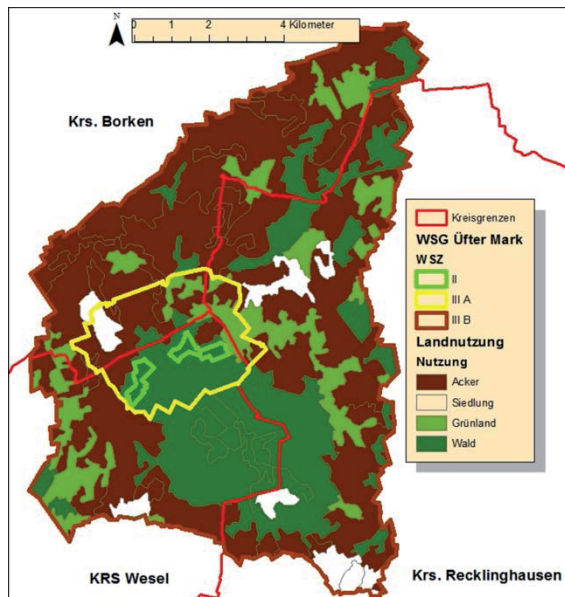


Abbildung 2: Flächennutzung im Untersuchungsgebiet nach CLC 2006 (UBA, DLR-DFD 2009)

2.3 Bodenkundliche Standortverhältnisse

Die bodenkundliche Situation des Untersuchungsgebietes wurde ausgewertet auf Basis der digitalen Bodenkarte 1:50.000 (© Geowissenschaftliche Daten: Geologischer Dienst NRW, Krefeld 044/2013) und ist in Abbildung 3 kartografisch dargestellt. In Tabelle 1 sind die wesentlichen Parameter der bodenkundlichen Ausprägung des Untersuchungsgebietes zusammengefasst.

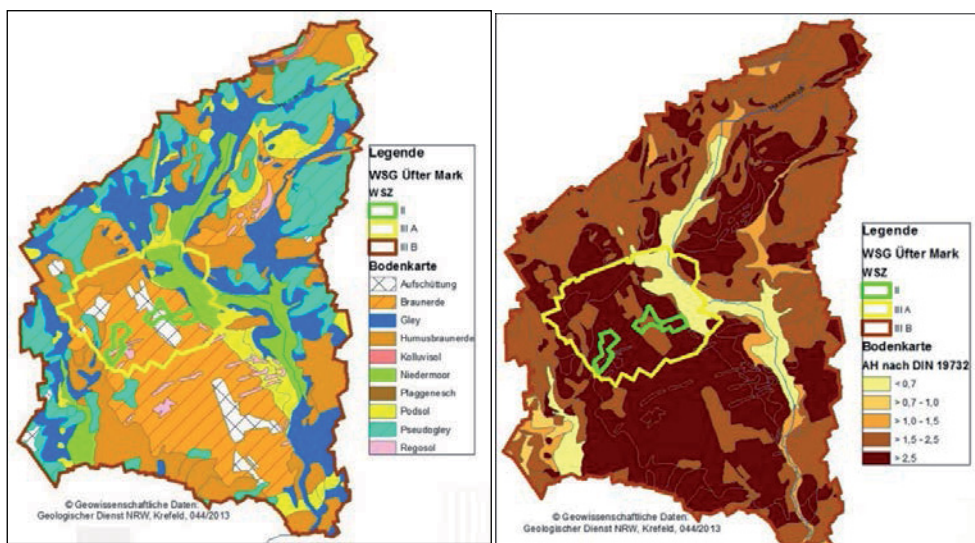


Abbildung 3: Bodentypen und Austauschhäufigkeiten nach DIN 19732 im Untersuchungsgebiet

Insgesamt dominieren im Untersuchungsgebiet mit ca. 7.500 ha die terrestrischen, grundwasserfernen Bodentypen der Braunerden, Podsole und Pseudogleye. Im Subtyp der

Humusbraunerden sind die Standorte mit organischer Substanz angereichert. Bei den grundwassernahen Standorten handelt es sich zu ca. 2.000 ha um Gleye und zu ca. 750 ha um Niedermoore.

Mit Ausnahme der Niedermoorstandorte werden sowohl bei den terrestrischen als auch semiterrestrischen Bodentypen im Untersuchungsgebiet die Oberböden aus sandigem bis lehmig-sandigem Bodensubstrat gebildet. Sie sind überwiegend geprägt von geringen bis mittleren Wasserspeicherkapazitäten, mittleren bis sehr hohen Wasserdurchlässigkeiten und geringen Bodenwertzahlen (15 - 40). Die Sickerwasserraten liegen laut digitaler Bodenkarte auf den grundwasserfernen Standorten in einer Größenordnung zwischen ca. 300 - 400 mm/a, auf den grundwassernahen Standorten der Gleye und Niedermoore reduzieren sich die Sickerwasser- bzw. Neubildungsraten durch den kapillaren Aufstieg auf ca. 180 mm/a (Gleye) bzw. ca. 100 mm/a (Niedermoore).

Auf Grund dieser bodenkundlichen Ausprägung der Deckschichten weist die weit überwiegende Mehrzahl der Standortbereiche im Untersuchungsgebiet - mit Ausnahme der Niedermoore - ein hohes bis sehr hohes Verlagerungspotenzial für nicht-sorbierbare Stoffe auf (Austauschhäufigkeiten (AH) von $> 1,5$ bis $> 2,5 \cdot a^{-1}$ nach DIN 19732). Diese Standorte sind damit durchgängig anfällig für den Eintrag von Nitrat in das Grundwasser. Auf den Niedermoorstandorten ist dieses Verlagerungspotenzial lediglich als „gering“ bis „sehr gering“ einzustufen ($AH < 1,0 \cdot a^{-1}$) (siehe Abbildung 3).

Tabelle 1: Bodenkundliche Kennwerte aus dem Untersuchungsgebiet

Abteilung	Klasse	Bod.-typ	Kürzel	We (dm)	nFK	FKWe (mm)	KF	KRWe (mm/d)	Ø Denitrif. (kg/ha*a)	Bod.-art-gruppe	SWR (mm/a)	AH	Fläche (ha)	
Aufschüttung (ohne Bodenentwicklung)			>X84	8	102	164	133	0	10	sandig	323	2	349,2	
Terrestrische Böden (grundwasserfern)	Anthropogene Böden	Kolluvisol	K74	7	127	174	193	0	20	lehmig-sandig	314	1,8	21,42	
		Gley-Kolluvisol	G-K74	7	127	174	193	0	40	lehmig-sandig	314	1,8	4,79	
		Plaggenesch	mE73	8	143	203	175	0	20	lehmig-sandig	305	1,5	23,39	
	Ah/C-Böden	Podsol-Regosol	P-Q85	7	71	102	223	0	10	sandig	341	3,3	156,6	
	Braunerden	Gley-Humusbraunerde	G-Bh72	7	104	137	216	0	40	lehmig-sandig	323	2,4	70,26	
		Humusbraunerde	Bh72	7	104	137	216	0	20	lehmig-sandig	323	2,4	109,34	
		Humusbraunerde	Bh73	7	96	123	225	0	20	lehmig-sandig	328	2,7	188,4	
		Humusbraunerde	Bh73	8	135	192	175	0	20	lehmig-sandig	309	1,6	69,73	
		Humusbraunerde	Bh74	7	92	118	225	0	20	lehmig-sandig	328	2,8	878,24	
		Podsol-Braunerde	P-B84	6	52	70	245	0	10	sandig	357	5,1	1930,8	
		Podsol-Braunerde	P-B85	7	68	98	225	0	10	sandig	348	3,6	323,56	
		Pseudogley-Humusbraunerde	S-Bh72	8	132	195	145	0	20	lehmig-sandig	309	1,6	176,36	
		Pseudogley-Humusbraunerde	S-Bh73	7	96	123	225	0	20	lehmig-sandig	328	2,7	41,07	
		Pseudogley-Humusbraunerde	S-Bh74	7	92	118	225	0	20	lehmig-sandig	328	2,8	736,87	
	Podsole	Braunerde-Podsol	B-P84	7	82	114	215	0	10	sandig	334	2,9	65,88	
		Braunerde-Podsol	B-P84	6	51	68	250	0	10	sandig	357	5,3	0,57	
		Gley-Podsol	G-P84	6	54	72	250	0	40	sandig	357	5	96,12	
		Gley-Podsol	G-P84	6	54	72	250	5	60	sandig	357	2,9	19,61	
		Gley-Podsol	G-P85	6	54	72	250	0	20	sandig	357	5	41,49	
		Gley-Podsol	G-P85	6	54	72	250	0	40	sandig	357	5	60,08	
		Gley-Podsol	G-P85	6	54	72	250	0	40	sandig	357	5	23,8	
		Gley-Podsol	G-P85	6	54	72	250	0	40	sandig	357	5	32,61	
		Gley-Podsol	G-P85	6	54	72	250	0	40	sandig	357	5	21,16	
		Gley-Podsol	G-P85	6	54	72	250	5	60	sandig	357	2,9	18,52	
		Gley-Podsol	G-P85	6	54	72	250	0	20	sandig	357	5	15,81	
		Gley-Podsol	G-P85	6	54	72	250	5	60	sandig	357	2,9	39,08	
		Gley-Podsol	G-P85	6	54	72	250	0	40	sandig	357	5	33,56	
		Gley-Podsol	G-P85	6	51	68	250	5	60	sandig	357	3	39,05	
		Podsol	P85	7	70	99	225	0	10	sandig	341	3,4	9,17	
		Podsol	P85	7	68	98	225	0	10	sandig	348	3,6	143,66	
		Pseudogley-Podsol	S-P84	6	54	72	250	0	20	sandig	357	5	142,5	
		Pseudogleye	Podsol-Pseudogley	P-S73	7	93	135	205	0	40	lehmig-sandig	328	2,4	24,59
			Pseudogley	S42	10	162	373	26	0	60	sandig-lehmig	298	0,8	92,97
Pseudogley			S72	8	118	182	141	0	40	lehmig-sandig	318	1,7	23,58	
Pseudogley	S73		7	92	135	187	0	40	lehmig-sandig	328	2,4	1301,73		
Pseudogley	S73		7	98	141	200	0	40	lehmig-sandig	328	2,3	216,36		
Pseudogley	S73		8	124	184	175	0	40	lehmig-sandig	314	1,7	258,83		
Semiterrestrische Böden (grundwasserma)	Gleye	Gley	G73	6	78	108	218	6	60	lehmig-sandig	341	1,5	360,82	
		Gley	G73	6	81	117	205	6	60	lehmig-sandig	334	1,3	18,32	
		Gley	G84	6	59	79	243	6	60	sandig	357	2,2	950,98	
		Gley	G84	2	20	26	243	6	100	sandig	407	8,7	12,7	
		Gley	G84	6	58	78	245	6	60	sandig	357	2,3	1,94	
		Gley	G85	6	59	79	243	6	60	sandig	357	2,2	635,56	
		Gley	G85	6	60	81	243	0	20	sandig	348	4,3	29,49	
		Podsol-Gley	P-G84	6	54	72	250	5	60	sandig	357	2,9	1,12	
Podsol-Gley	P-G84	6	54	72	250	6	60	sandig	357	2,5	15,08			
Moore	Moore	Niedermoor	HN03	4	240	312	100	6	100	organisch	275	0,3	744,26	
		Niedermoor	HN03	2	120	156	100	6	100	organisch	314	0,9	0,44	

We : effektiver Wurzelraum; KR : kapillarer Aufstieg i. d. Wurzelraum; Denitrif.: mittlere Denitrifikationsleistung im Wurzelraum; SWR: Sickerwasserate; AH: Austauschhäufigkeit (nach DIN 19732, ohne KRWe)

Die weiteren Auswertungen zur Erfassung der klimabedingten Einflüsse auf die landwirtschaftliche Flächennutzung beschränkten sich auf die ackerbaulich genutzten Standorte im Untersuchungsgebiet. Grundlage hierfür waren die Corine Landcover Daten 2006 (UBA, DLR-DFD 2009). Auf diesen Flächen (ca. 5.800 ha) gestaltete sich die bodenkundliche Situation wie in Abbildung 4 dargestellt.

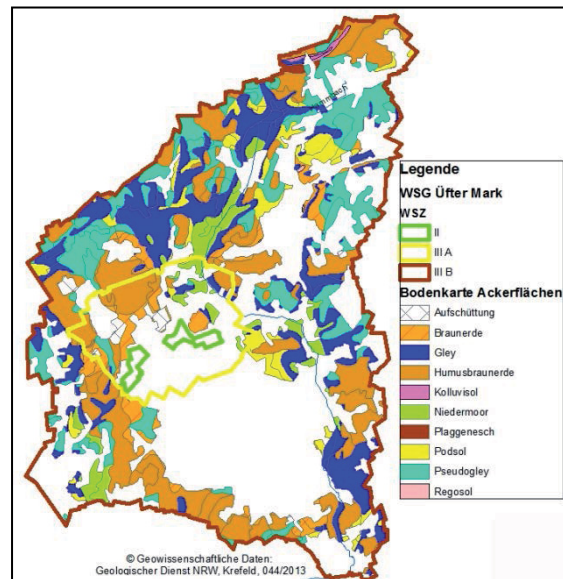


Abbildung 4: Bodenkarte der Ackerflächen nach CLC 2006 (UBA, DLR-DFD 2009) im Untersuchungsgebiet

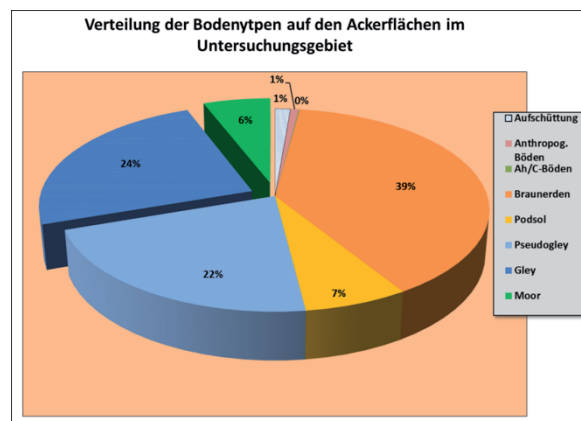


Abbildung 5: Bodentypen-Verteilung (%) auf den Ackerflächen nach CLC 2006 (UBA, DLR-DFD 2009) im Untersuchungsgebiet

Die Ergebnisse in Abbildung 5 zeigen, dass die Ackerflächen im Untersuchungsgebiet zu ca. 70 % von den terrestrischen, grundwasserfernen Bodentypen der Braunerden, Podsole und Pseudogleye geprägt sind, weitere 30 % von semiterrestrischen, grundwassernahen Standorten der Gleye und Niedermoore.

2.4 Eckdaten der Wassergewinnung im Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet liegt im Übergangsbereich zwischen Niederrheinischer Bucht und Münsterländer Kreidebecken. Im Untersuchungsgebiet Üfter Mark wird aus 2 Brunnengalerien (Brunnengalerie Ost und West) mit insgesamt 20 bis in eine Tiefe von 100 m unter GOK verfilterten Förderbrunnen Grundwasser für die Trinkwasserversorgung gewonnen. Insgesamt ist für die Brunnengalerie eine Entnahme von 11 Mio m³/a bewilligt (Losen & Konrads 1998). Verfiltert sind die Brunnen überwiegend in den sandig bis kiesig ausgeprägten Schichten der Halterner Sande, lediglich 2 Brunnen erschließen die darunter liegenden und geringer durchlässigen Schichten des Recklinghäuser Sandmergels.

Im Hauptgrundwasserleiter der Halterner Sande und des Recklinghäuser Sandmergels erfolgt die Grundwasserströmung im Wesentlichen in Nord-Süd-Richtung zur Lippe.

Die Entwicklung der Grundwasserbeschaffenheit im Untersuchungsgebiet wird durch den bewirtschaftenden Wasserversorger an einer Vielzahl von Grundwassermessstellen (GWM) regelmäßig überwacht. Bei einem mittleren Grundwasserflurabstand von ca. 8 m u. GOK weisen insbesondere die flach verfilterten Grundwassermessstellen, in welchen Nitrat-Konzentrationen von bis zu 200 mg/l gemessen werden, auf die starke anthropogene Beeinflussung vor allem aus einer intensiven landwirtschaftlichen Flächennutzung hin. In den tieferen Bereichen des Grundwasserleiters liegen die Nitrat-Konzentrationen zwar noch in einer Größenordnung von < 10 mg/l, in den darüber liegenden Bereichen oberhalb von 40 m u. GOK (= ca. 30 m unter Grundwasseroberfläche) werden lokal bereits Nitrat-Konzentrationen von bis zu 125 mg/l gemessen.

Die Nitrat-Konzentrationen im geförderten Rohwasser unterschieden sich deutlich in Abhängigkeit von den jeweiligen Förderbrunnen. Sowohl im aus der Brunnengalerie Ost als auch West geförderten Grundwasser ist seit den 90er Jahren ein leicht ansteigender Trend der Nitratkonzentrationen zu verzeichnen. Während das Konzentrationsniveau jedoch in der Brunnengalerie Ost noch in einer Größenordnung von ca. 10 mg/l liegt, werden im Rohmischwasser der Brunnengalerie West bereits Nitratkonzentrationen von ca. 50 mg/l gemessen, bei erheblichen Schwankungsbreiten zwischen den hier gelegenen Förderbrunnen von ca. 60 mg/l.

Für weitere Details zur wasserwirtschaftlichen, hydrochemischen und hydrogeologischen Situation im Untersuchungsgebiet wird auf die beiden *dynaklim*-Publikationen von Barein et al. (2013) sowie Kübeck et al. (2013) verwiesen, in welchen diese Aspekte detailliert beschrieben werden.

2.5 Landwirtschaftliche Flächennutzung im Untersuchungsgebiet

Eine Erstausswertung zur landwirtschaftlichen Flächennutzung im Untersuchungsgebiet wurde auf Basis der Corine Landcover Daten 2006 (UBA, DLR-DFD 2009) durchgeführt (siehe Abbildung 2, Abbildung 6).

Demnach werden ca. 7.100 ha im Untersuchungsgebiet landwirtschaftlich genutzt (Acker: 5.790 ha; Grünland: 1.331 ha), 2.982 ha waldbaulich und weitere 486 ha als Siedlungsbereiche.

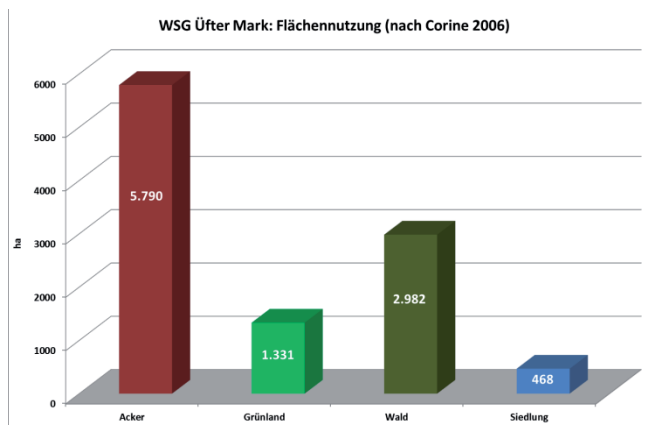


Abbildung 6: Flächennutzung im WSG Üfter Mark nach CLC 2006 (UBA, DLR-DFD 2009)

Die weitere Analyse der im Untersuchungsgebiet angebaute landwirtschaftlichen Kulturen erfolgte zunächst auf Basis der Ergebnisse der Landwirtschaftszählung bzw. Agrarstrukturerhebung des Jahres 2010 (IT.NRW 2011). Hierzu wurden die auf Gemeindeebene erfassten Angaben zur landwirtschaftlichen Flächennutzung entsprechend des Flächenanteils des jeweiligen Gemeindegebietes am Untersuchungsgebiet Üfter Mark umgerechnet.

Die Ergebnisse dieser Auswertung zeigen zwar, dass die Bewertungen zum Umfang landwirtschaftlicher Nutzflächen nach CLC 2006 (ca. 68 %) bzw. IT.NRW 2011 (ca. 50 %) nicht unerheblich voneinander abweichen. Beide Verfahren bzw. Berechnungsverfahren weisen offensichtlich mehr oder weniger große Unschärfen aus. Nach Auswertungen der Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen, Kreisstelle Borken, werden ca. 53 % der Fläche des

Untersuchungsgebietes landwirtschaftliche genutzt (Acker: 4.531 ha; Grünland: 1.126 ha; Sonderkulturen: 23 ha)(LWK NRW 2012a). Somit wird die landwirtschaftliche Nutzfläche nach CLC 2006 grundsätzlich zwar zu hoch eingeschätzt, die lokale Verteilung der landwirtschaftlichen Nutzflächen im Untersuchungsgebiet ist jedoch für die weiteren Auswertungen hinreichend präzise.

Die Auswertungen zu den im WSG angebauten Kulturen (Tabelle 2, nach IT.NRW 2011) entsprechen den tatsächlich vor Ort vorzufindenden Gegebenheiten. Demnach wird die ackerbauliche Flächennutzung zu mehr als 80 % vom Getreide- und Maisanbau dominiert. Ca. weitere 10 % der Ackerfläche werden für den Anbau von Kartoffeln und Feldgras / Ganzpflanzensilage genutzt. Eine besondere Rolle hinsichtlich der Flächennutzung spielt in der Region grundsätzlich der (Vertrags-) Anbau von Sonderkulturen wie Feldgemüse (Spinat / Kräuter / Kohl / Erdbeeren), u. a. für ein großes in der Region ansässiges Unternehmen zur Produktion von Tiefkühlkost. Nach Eigenangaben dieses Unternehmens wird in der Region von ca. 100 Vertragslandwirten auf mehreren tausend ha ein entsprechender Vertragsanbau praktiziert.

Im Wasserschutzgebiet Üfter Mark spielt dieser Vertragsanbau mit einem Umfang von ca. 4 % an der ackerbaulich genutzten Fläche (nach IT.NRW 2011) nur eine untergeordnete Rolle.

Bereits 1992 wurde in Teilbereichen des Wasserschutzgebietes Holsterhausen / Üfter Mark eine Gewässerschutzkooperation mit den im Schutzgebiet wirtschaftenden Landwirten und dem Wasserversorgungsunternehmen RWW gegründet (Herzberg, 2001). Innerhalb dieser Kooperation werden Maßnahmen für eine gewässerschützende Landwirtschaft vereinbart, die Landwirte bei der Umsetzung dieser Maßnahmen durch eine zusätzliche Gewässerschutzberatung unterstützt und die ihnen entstehenden Mehraufwendungen bzw. Ertragseinbußen nach einvernehmlich vereinbarten Sätzen durch das Wasserversorgungsunternehmen ausgeglichen.

Seit 1992 ist diese Kooperation stetig gewachsen. Nach Angaben der Landwirtschaftskammer NRW, Kreisstelle Borken (2012), wurden in 2011 im Wasserschutzgebiet Üfter Mark ca. 60 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche von 138 Kooperationsmitgliedern bewirtschaftet.

Lediglich zu diesen Kooperationsflächen lagen auch differenziertere Information zum angebauten Kulturartenspektrum vor, die sich relativ gut mit den Auswertungen nach IT.NRW (2011) decken (siehe Tabelle 2).

Tabelle 2: Land- und forstwirtschaftliche Flächennutzung im WSG Üfter Mark (nach IT NRW 2011; LWK NRW 2012a)

Land- u. forstwirtschaftliche Flächennutzung im WSG Üfter Mark 2010/2011				
Flächennutzung in...	nach IT NRW (2011)		nach LWK NRW (2012)	
	...WSG	...LN	...LN	...Koop.-Fläche
Größe ges. (ha)	10571,4	5350,4	5680,0	3415,6
Getreide (%)	13,0	25,7		22,3
Mais (%)	19,2	37,9		45,3
GPS/Feldgras (%)	2,6	5,2		6,9
Kartoffeln (%)	1,6	3,1		5,6
ZR (%)	0,2	0,3		0,1
Gemüse/Erdbeeren (%)	1,8	3,6		3,0
Sonstiges (%)	0,7	1,4		1,5
Grünland (%)	11,5	22,7		15,2
Wald (%)	4,0	0,0		0,1
Summe LN (%)	50,6	100,0		100,0
LN= Landwirtschaftliche Nutzfläche, Koop.-Fläche= Kooperationsfläche; GPS= Ganzpflanzensilage; ZR= Zuckerrüben				

Die Ergebnisse zeigen, dass die ackerbauliche Flächennutzung zu fast 80 % vom Getreide- (26 %) und Maisanbau (53 %) dominiert wird.

Dieser hohe Getreide- und Maisanbau weist bereits auf die intensiven Veredelungsaktivitäten durch Viehwirtschaft in der Projektregion hin. So verteilen sich nach CLC 2006 die ackerbaulich genutzten Flächen im Untersuchungsgebiet zu ca. 47 % auf den Kreis Borken, zu ca. 37 % auf den Kreis Recklinghausen und zu ca. 16 % auf den Kreis Wesel. Vor allem die Kreise Borken und Recklinghausen gehören, u. a. durch ihre hohen Viehbesatzdichten, als Teilräume des Münsterlandes zu einem der führenden Agrarräume Nordrhein-Westfalens und Deutschlands. In den Gemeinden, auf deren Gebiet das WSG Üfter Mark liegt, lagen diese Viehbesatzdichten im Jahr 2010 nach IT.NRW (2011) zwischen 1,65 und 2,76 GV/ha (siehe Tabelle 3), im flächengewichteten Durchschnitt bei 2,25 GV/ha. Neben diesen schon hohen Viehbesatzdichten ist es in den vergangenen Jahren in der Region zu einem intensiven Ausbau der Biogaserzeugung gekommen. Der Kreis Borken nimmt mit 87 Biogasanlagen, einer installierten elektrischen Gesamtleistung von 33 MW und einer flächenbezogenen Leistung von 34 kW/100 ha LF mit Abstand eine führende Stellung hinsichtlich der Leistungsdichte in Nordrhein-Westfalen ein. Ca. 12 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche im Kreis Borken werden mittlerweile für den Anbau von Biomasse für die Biogaserzeugung benötigt (Dahlhoff 2013). Bei gleichbleibenden Viehbeständen geht mit diesem zusätzlichen landwirtschaftlichen Erwerbszweig in der Region eine erhebliche Flächenkonkurrenz und damit auch ein Intensivierungsdruck einher. Nach Auswertungen von Fohrmann (2013) hat sich durch den Wegfall der für die Biomasseproduktion verwendeten Flächen im Kreis Borken, die zumindest rechnerisch nicht mehr oder nur noch begrenzt für die Aufnahme von Wirtschaftsdüngern zur Verfügung stehen, der Viehbesatz auf den verbleibenden landwirtschaftlichen Nutzflächen im Kreis Borken von ca. 2,5 auf ca. 3,0 GV/ha erhöht. Exakte Angaben zum Anteil von Biogasflächen in der Projektregion lagen nicht vor, es ist jedoch davon auszugehen, dass diese Intensivierungszwänge sich kreisübergreifend auf die Flächen des Projektgebietes auswirken.

Tabelle 3: Viehbesatzdichten im Untersuchungsgebiet (nach IT.NRW 2011)

Gemeinde	Kreis	GV/ha (2010)
Raesfeld	Borken	2,76
Borken	Borken	2,62
Heiden	Borken	2,32
Dorsten	Recklinghsn.	2,08
Schermbeck	Wesel	1,65
Ø (flächengewichtet)		2,25

Vor dem Hintergrund dieser intensiven landwirtschaftlichen Flächennutzung und den bekannten und z. T. sehr hohen Belastungen zumindest des oberflächennahen Grundwasserleiters durch Nitrateinträge ließ die RWW Rheinisch-Westfälische Wasserwerksgesellschaft mbH u. a. in den Jahren 2007- 2010 Studien zur weiteren Differenzierung der Ursachen dieser hohen Nitrateinträge durchführen (Drechsler 2007, 2009, 2010). Neben einer bodenkundlichen Analyse und Bewertung der Austragseigenschaften des Untersuchungsgebietes wurden in diesen Studien u. a. ca. 40 Tiefbohrungen bis in eine Tiefe von überwiegend 9 - 11 m bzw. bis zur Grundwasseroberfläche durchgeführt und in 50 cm-Abschnitten Sedimentproben auf ihre Nitrat- und Sulfat-Gehalte untersucht. Auf diesem Wege konnten durchgehende Tiefenprofile der Nitrat-Konzentration für den Bereich der Sickerwasser-Zone erhoben werden. Die Ergebnisse zeigten, dass unter den ackerbaulich genutzten und grundwasserfernen Standorten die Nitratkonzentrationen im Sickerwasser im Durchschnitt bei ca. 100 mg NO₃/l lagen, mit Spannweiten von ca. 45 - 380 mg NO₃/l. Unter Berücksichtigung der berechneten Jahres-Sickerwasserraten errechneten sich aus diesen Konzentrationswerten unter den grundwasserfernen Ackerstandorten jährliche Austragsfrachten von ca. 90 - 100 kg N/ha, die nahezu um den Faktor 2 oberhalb der im Durchschnitt gemessenen Nmin-Restwerte zum Ende der Vegetationsperiode lagen. Außerdem zeigten ergänzende Untersuchungen, dass auf den grundwasserfernen Standorten jährlich bis zu 100 kg N/ha aus dem Bodenvorrat nachgeliefert werden können.

Deutlich geringere Nitrat-Konzentrationen im Tiefenprofil von ca. 35 mg NO₃/l waren - bei vergleichbaren Bewirtschaftungsbedingungen - auf den grundwassernahen Standorten festzustellen, bedingt durch die anaeroben und reduzierenden Bedingungen in den oberen Bodenschichten in Folge des Grundwassereinstaus (Drechsler 2007, 2009, 2010).

2.6 Klima

Das Projektgebiet liegt in einem überwiegend maritim geprägten Klimabereich mit allgemein kühlen Sommern und milden Wintern, gelegentlich durchbrochen von kontinentalen Witterungseinflüssen mit längeren Phasen hohen Luftrucks. Im Winter sind kontinental geprägte Wetterlagen häufig mit Kälteperioden verbunden, im Sommer kann es bei schwachen östlichen Winden zu höheren Temperaturen und trockenem sommerlichen Wetter kommen.

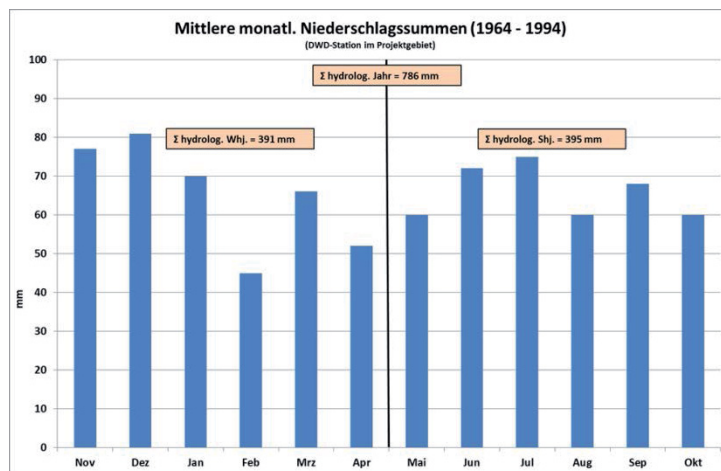


Abbildung 7: Mittlere monatliche Niederschlagssummen 1964 - 1994 (Drechsler 2007)

Auswertungen der Niederschlagsdaten der DWD-Station Holsterhausen des Zeitraumes 1964 - 1994 (Drechsler 2007, 2009) zeigen bei einer mittleren Jahresniederschlagssumme von 786 mm im Durchschnitt eine gleichmäßige Verteilung der Niederschläge über das hydrologische Winter- und Sommerhalbjahr (Abbildung 7).

Eigene Auswertungen von Witterungsdaten der dem Untersuchungsgebiet nächstgelegenen DWD-Stationen für den Zeitraum 1996 - 2010 bestätigen grundsätzlich die ausgeglichene Niederschlagsverteilung im hydrologischen Sommer- und Winterhalbjahr bei einer leicht erhöhten mittleren Jahresniederschlagssumme. Die mittlere jährliche Lufttemperatur liegt bei 9,8 °C bei ca. 1.520 Sonnenscheinstunden/Jahr (Abbildung 8).

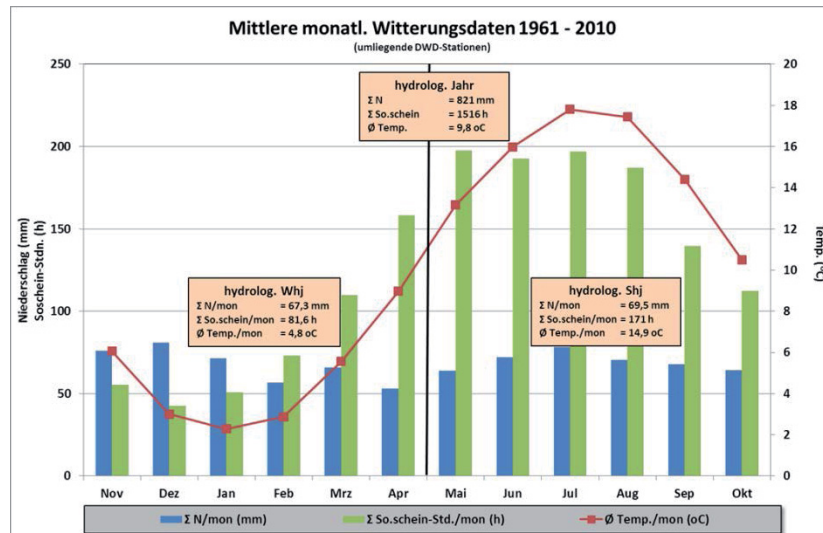


Abbildung 8: Mittlere monatliche Witterungsdaten verschiedener DWD-Stationen im Umkreis des Projektgebietes 1961 - 2010

3 Klimaprojektionen

Zur Projektion der klimatischen Veränderungen bis zum Jahr 2100 wurde in *dynaklim* als einheitliche Datengrundlage das Regionale Klimamodell CLM (Climate Local Model) verwendet. Es wurden die Daten der CLM-Realisierungen CLM_C20_1_D3 und CLM_C20_2_D3 herangezogen. Bis ins Jahr 2000 wurden die Modellrechnungen mit den weltweit beobachteten Treibhausgasemissionen durchgeführt, ab dem Ende des 20. Jahrhunderts werden dann die Treibhausgasemissionen des SRES-Szenarios A1B berücksichtigt. Die beiden resultierenden Datenreihen für den in *dynaklim* betrachteten Zeitraum von 1961 - 2100 werden im Folgenden kurz CLM1 und CLM 2 benannt. Zur vergleichenden Bewertung der Klimaprojektionen wurden innerhalb von *dynaklim* die drei Betrachtungszeiträume „Referenzzeitraum“ (1961 - 1990), „Nahe Zukunft“ (2021 - 2050) und „Ferne Zukunft“ (2071 - 2100) definiert. Eine umfangreiche Beschreibung der Auswertungen dieser modellierten Klimadaten für die gesamte *dynaklim*-Projektregion findet sich in der *dynaklim*-Publikation von Quirnbach et al. (2012). Für weitere Details wird daher auf diese Publikation verwiesen.

In der Gegenüberstellung der Mittelwerte der relevanten Klimaparameter dieser drei Betrachtungszeiträume zeigen die Klimaprojektionen, dass es in der Projektregion zu keiner nennenswerten Veränderung der mittleren jährlichen Niederschlagsmengen kommt, die mit ca. 800 mm ziemlich konstant bleiben. Vor allem für die „Ferne Zukunft“ sind aber deutliche Verschiebungen in der jährlichen Verteilung der Niederschläge hin zu trockeneren Sommern und feuchteren Wintern zu erwarten. Deutliche Veränderungen sind hinsichtlich der mittleren Jahrestemperaturen zu erwarten, die sich kontinuierlich von ca. 9,6 °C (Ø 1961 - 1990) auf ca. 12,8 °C (Ø 2071 - 2100) erhöhen werden (Abbildung 9).

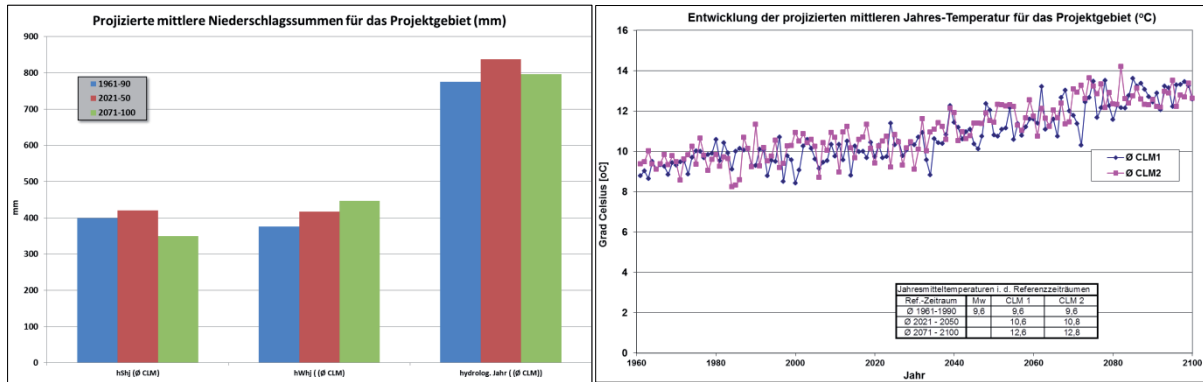


Abbildung 9: Entwicklung der Niederschlagsmengen und Lufttemperaturen im Untersuchungsgebiet im Zeitraum 1961 - 2100

Quirnbach et al. (2012) werteten darüber hinaus die modellierten Klimadaten für die gesamte *dynaklim*-Projektregion am Beispiel sogenannter „Kenntage“ differenzierter aus. Demnach ist in der Projektregion zukünftig u. a. mit einer zunehmenden Anzahl von „Trockentagen“ (Niederschlag < 0,1 mm/d), einer zunehmenden Zahl von Tagen/Jahr mit Starkniederschlagsereignissen sowie einer zunehmenden Zahl von Sommer- ($T_{max} \geq 25 \text{ °C}$) bzw. heißen Tagen ($T_{max} \geq 30 \text{ °C}$) und abnehmenden Zahl von Frost- ($T_{min} \leq 0 \text{ °C}$) bzw. Eistagen ($T_{max} \leq 0 \text{ °C}$) zu rechnen.

Aus vegetationsökologischer Sicht ist darüber hinaus die zunehmende Anzahl und Dauer von Trockenperioden von Bedeutung.

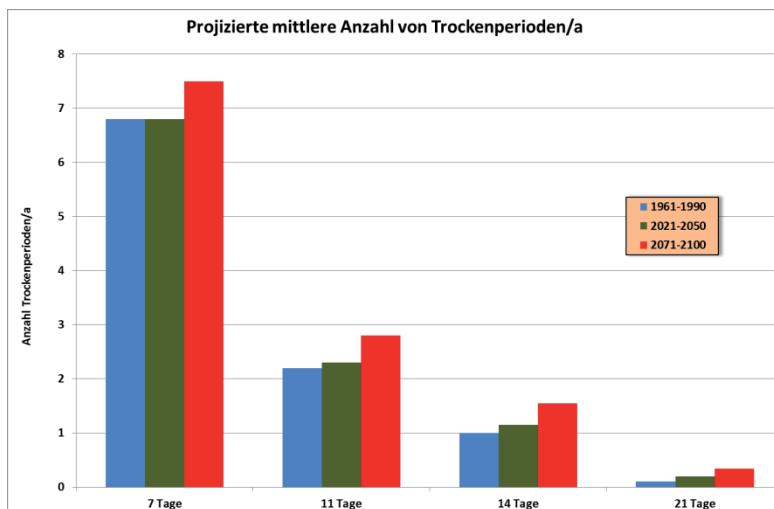


Abbildung 10: Mittlere Anzahl von Trockenperioden/Jahr ($N < 0,1 \text{ mm/d}$) im *dynaklim*-Projektgebiet (Quirnbach et al. 2012)

4 Modellierung des Bodenstoff- und Wasserhaushaltes

Vor dem Hintergrund dieser projizierten klimatischen Veränderungen sollte im Folgenden der Einfluss auf den Bodenstoff- und Wasserhaushalt der ackerbaulich genutzten Flächen im Untersuchungsgebiet bewertet werden.

Zu diesem Zweck wurden mit dem Simulationsmodell CANDY (siehe Kap. 1.1) unter Berücksichtigung der auf den Ackerflächen praktizierten Bewirtschaftungsmaßnahmen die Umsetzungs- und Verlagerungsprozesse unter einer Auswahl von Ackerflächen modelliert.

Die Modellierungsarbeiten wurden in drei Schritten vollzogen:

1. In einem ersten Schritt wurden ausgewählte Ergebnisse der in Kap. 2.5 bereits erwähnten Studien von Drechsler (2007, 2009) herangezogen. Ziel war es, die Stoffkonzentrationen, die

im Rahmen dieser Studie in den Tiefenprofilen messtechnisch ermittelt wurden unter Berücksichtigung der tatsächlich auf den relevanten Flächen erfolgten Bewirtschaftungsmaßnahmen mit Hilfe des Modells CANDY modelltechnisch nachzubilden. Die Notwendigkeit für diesen Arbeitsschritt ergibt sich aus der Tatsache, dass der Stickstoffhaushalt eines Bodens - neben den praktizierten Bewirtschaftungsmaßnahmen - in erster Linie vom Kohlenstoffumsatz, also vom Umsatz der organischen Substanz des jeweiligen Standortes angetrieben wird. Zur Beschreibung des Kohlenstoffumsatzes bietet CANDY eine Reihe von Möglichkeiten der Parametrisierung, die an die Gegebenheiten vor Ort angepasst werden müssen. Da zu diesen notwendigen Parametern keine oder nur begrenzt vor Ort erhobene Messwerte vorlagen, war es die Absicht, diese iterativ derart einzustellen, bis die Modellergebnisse den messtechnisch erhobenen Daten zum Stickstoffumsatz - bzw. der Stickstoff-Verlagerung entsprechen. Zu diesem Zweck wurden aus den Untersuchungsergebnissen von Drechsler (2007, 2009) drei Tiefenprofile ausgewählt. Die Bewirtschaftungsdaten der zugehörigen Flächen für den entsprechenden Zeitraum wurden in Absprache mit den betroffenen Landwirten von der Landwirtschaftskammer NRW, Kreisstelle Borken (LWK NRW 2012a), zusammengestellt und für diese Untersuchungen zur Verfügung gestellt. Als klimatische Eingangsdaten wurden für den in den Modellläufen berücksichtigten Zeitraum die tatsächlich vor Ort gemessenen Klimadaten verwendet. Bei hinreichender Übereinstimmung der Modellergebnisse mit den tatsächlich vor Ort erhobenen Messdaten, wird davon ausgegangen, dass das Modell an die standörtlichen Gegebenheiten angepasst ist und mit diesen Einstellungen die Modellierungen mit den projizierten Klimadaten durchgeführt werden können. Die Modellläufe erfolgten mit einem Zeitinkrement von einem Tag.

2. Im nächsten Schritt erfolgten die CANDY-Modellläufe auf Einzelschlagbasis für ausgewählte, als repräsentativ erachtete Standorte im Untersuchungsgebiet mit den projizierten CLM-Klimadaten. Verwendet wurden die Klimadaten des CLM-Modellaufes CLM2. Es wurde jeweils ein zusammenhängender Zeitraum von 1961 bis 2100 modelliert. Als Zeitinkrement für die Ausgabedaten wurde bei diesen langfristigen Modellläufen aus arbeits- und zeitökonomischen Gründen ein Monat gewählt. Die relevanten Bewirtschaftungsdaten wurden nach Angaben der Landwirtschaftskammer NRW, Kreisstelle Borken, zusammengestellt. Es wurden ausgewählte und für die Region typische ackerbauliche Fruchtfolgen zusammengestellt. Die Angaben zu Aussaat- und Ernteterminen und Bodenbearbeitungsmaßnahmen wurden aus den Erfahrungen der landwirtschaftlichen Berater vor Ort zusammengestellt, Erträge auf Basis der statistischen Erhebungen der landwirtschaftlichen Bodennutzungshaupterhebung. Die Angaben zu Zeitpunkten und Höhe der mineralischen und organischen Düngung erfolgten auf Basis der vor Ort gegebenen Beratungsempfehlungen entsprechend des Ratgebers für Pflanzenbau und Pflanzenschutz (LWK NRW 2012b). Darüber hinaus wurden auch die in Schritt 1 modellierten Flächen unter Berücksichtigung der hier angegebenen Bewirtschaftungsdaten für den Zeitraum 1961 - 2100 und für alle ausgewählten repräsentativen Standorte modelliert.
3. In einem dritten Schritt wurden in einigen Modellläufen in Abhängigkeit von den Ergebnissen aus Schritt 2 Bewirtschaftungsparameter (vor allem zur N-Düngung) geändert, um deren Einfluss auf die Ergebnisparameter, v. a. zum N-Austrag, zu erfassen.

Die über CANDY ausgegebenen Ergebnisse zu den einzelnen modellierten Parametern wurden über eine Modell-eigene Schnittstelle nach MS Excel exportiert und hier weiter ausgewertet.

4.1 Modellierung der Referenzflächen (2005 - 2009)

Die Nitrattiefenprofile der drei aus den Untersuchungen von Drechsler (2007, 2009) ausgewählten Tiefbohrungen sind in Abbildung 11 dargestellt. Die Aufnahme dieser Tiefenprofile erfolgte für die Tiefbohrung TB15 im Frühjahr 2006, für die Tiefbohrungen 08 und 63 im Herbst 2009. Die

bodenkundlichen Kenndaten zu diesen Standorten wurden für die Modellläufe bis zu Profiltiefen von 2m der Digitalen Bodenkarte 1:50.000 entnommen.

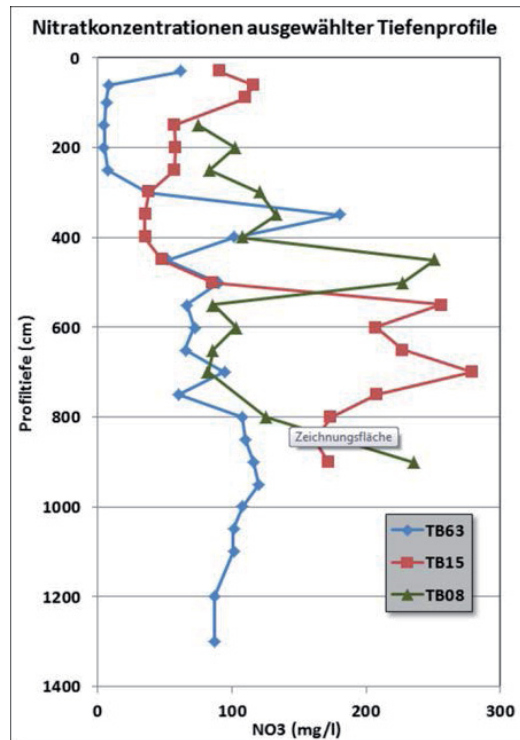


Abbildung 11: Nitratkonzentration ausgewählter Tiefenprofile (Drechsler 2007, 2009)

Die Angaben zur Fruchtfolge und den Bewirtschaftungsmaßnahmen wurden für den Zeitraum von 2005 - 2009 von den für die Flächen zuständigen Gewässerschutzberatern der Landwirtschaftskammer NRW zur Verfügung gestellt. Bodenkundlich repräsentieren diese drei Standorte die Bodeneinheiten der sandigen Humusbraunerden und Podsole, die ca. 45% der ackerbaulich genutzten Standorte im Untersuchungsgebiet ausmachen (siehe Abbildung 5).

In Abbildung 12 sind exemplarisch am Beispiel der Fläche TB08 und für den Zeitraum 2005 - 2009 die Ergebnisse eines Modellaufes zur Entwicklung des mineralischen N-Gehaltes auf dieser Fläche dargestellt. Dem unteren Bereich der Grafik ist im Zeitverlauf die praktizierte Fruchtfolge zu entnehmen. Dargestellt sind weiterhin sowohl Höhe als auch Zeitpunkt von mineralischen und organischen N-Düngungen sowie (zumindest für die Jahre 2007 - 2009) als Kontroll- bzw. Vergleichsgröße der tatsächlich auf dieser Flächen gemessene Nmin-Gehalt zum Ende der Vegetationsperiode.

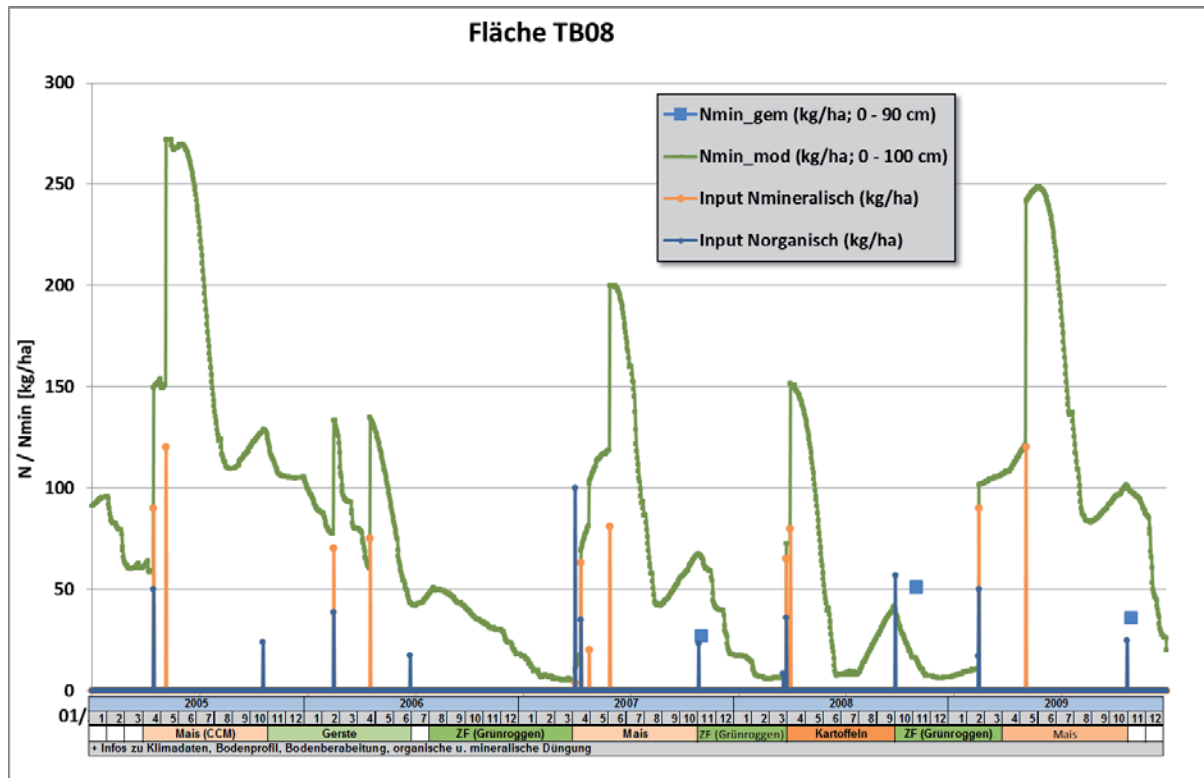


Abbildung 12: Modellierter Verlauf des Nmin (0 - 90 cm) auf der Fläche TB08

Aus den über das Modell ausgegebenen Angaben zu ausgewaschenen N-Mengen und Sickerwasserbildung lässt sich die resultierende Nitratkonzentration im Sickerwasser berechnen, die für die drei Referenzflächen in Abbildung 13 dargestellt ist.

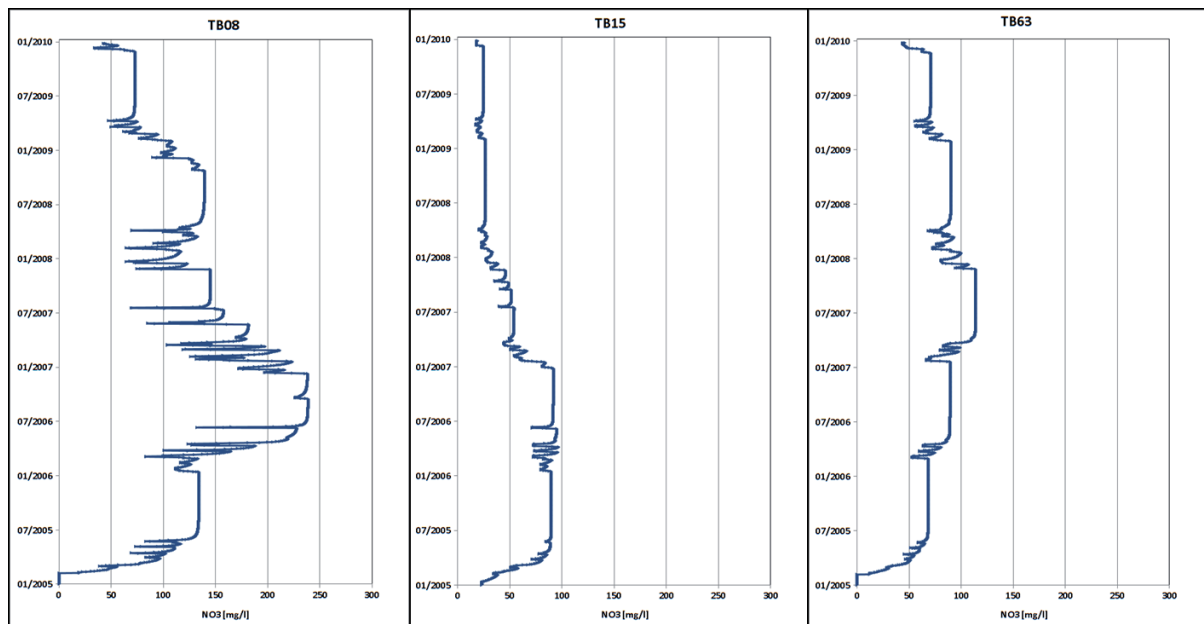


Abbildung 13: Nitratkonzentration im Sickerwasser unter den drei Referenzflächen (errechnet aus modellierten Ergebnissen zu N-Auswaschung und Sickerwasserbildung)

Die Zeitskala in Abbildung 13 ist auf der vertikalen y-Achse dargestellt, um anzudeuten, wie sich die Nitratkonzentrationen im Sickerwasser in etwa auch im vertikalen Bodenprofil darstellen würden.

Insgesamt deckt sich das tiefendifferenzierte Niveau der Nitratkonzentrationen in Abbildung 11 (tatsächlich gemessene Nitratkonzentrationen im Bodenprofil) bzw. in Abbildung 13

(Modellergebnisse) für die Flächen TB08 und TB63 relativ gut, so dass davon ausgegangen werden kann, dass das Modell CANDY die realen Bedingungen des N-Umsatzes auf diesen Fläche hinreichend präzise nachbildet. Für die Fläche TB15 wird nur begrenzt eine gute Übereinstimmung zwischen gemessenen und modellierten Ergebnissen erreicht. Die Ursache hierfür liegt insbesondere in dem auf dieser Fläche im Betrachtungszeitraum praktizierten Fruchtfolgeglied „Feldgras“, für das in allen Modellläufen keine hinreichend präzise Modellierung des N-Umsatzes im Boden erreicht werden konnte. Die Ursachen hierfür konnten nicht abschließend geklärt werden, möglicherweise liegen diese in den (pflanzenphysiologischen) Parametern, die für „Feldgras“ in der CANDY-Fachdatenbank hinterlegt sind.

Als weitere Zielgröße wurde mit CANDY unter den jeweiligen Fruchtfolgen der Bodenwasserhaushalt modelliert bzw. ausgewertet. In Abbildung 14 ist am Beispiel der Referenzfläche TB63 der Bodenwassergehalt (in mm für das Bodenprofil bis 100 cm Tiefe) dargestellt. Da CANDY keine direkten Ergebnisse zu einem potenziellen Beregnungsbedarf ausgibt, wurde dieser indirekt aus den Angaben zum Bodenwasserhaushalt abgeleitet. Bewässerungsbedarf wird unterstellt bei einer Unterschreitung des Bodenwassergehaltes von < 40 % der nutzbaren Feldkapazität (nFK), in Abbildung 14 dargestellt durch die rote Linie. Eine potenziell notwendige Bewässerungsmenge wurde ermittelt aus der Summe der Differenzen von potenzieller (Etp) und aktueller Evapotranspiration (Eta) in den Zeiträumen, in denen der Bodenwassergehalt 40 % der nFK unterschreitet. In Abbildung 14 ist dieser (theoretisch maximale) Bewässerungsbedarf als kumulierte Kurve für das hydrologische Jahr dargestellt.

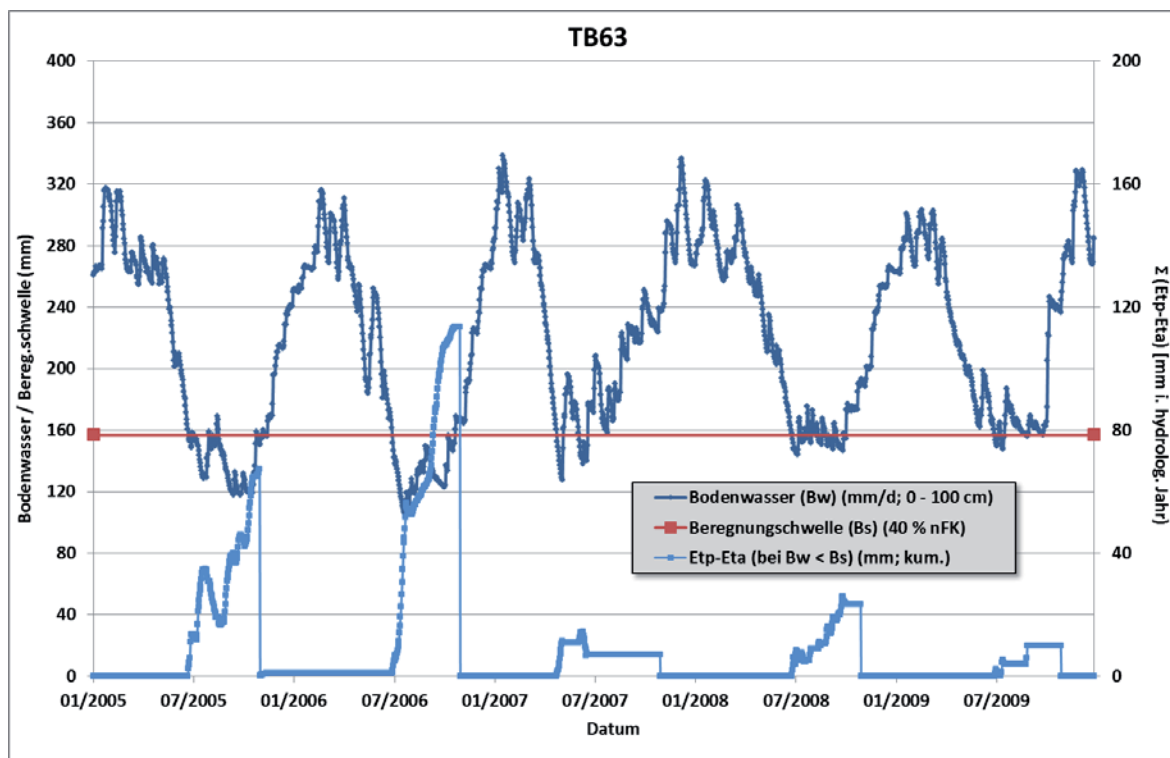


Abbildung 14: Bodenwassergehalt und Bewässerungsbedarf am Beispiel der Fläche TB63

Die Ergebnisse in Abbildung 14 zeigen, dass für diese Fläche im Zeitraum 2005 - 2009 unter den standörtlichen und bewirtschaftungsspezifischen Bedingungen praktisch in jedem Jahr ein z. T. erhebliches Defizit im Bodenwassergehalt festzustellen war. Ob auf dieses Defizit nun im Einzelfall tatsächlich durch Bewässerungsmaßnahmen reagiert wird, hängt letztlich von der Beregnungswürdigkeit der jeweiligen Kultur ab, d. h. der ökonomischen Bewertung, ob der durch eine Bewässerung erzielte finanzielle Mehrertrag der beregneten Kultur die entstehenden Kosten mindestens ausgleicht.

4.2 Modellergebnisse zum N-Haushalt für den Zeitraum 1961 - 2100

Für die Modellierung ausgewählter Fruchtfolgen für den Zeitraum 1961 - 2100 wurden 5 repräsentative Bodenstandorte aus dem Untersuchungsgebiet ausgewählt. Aus Abbildung 5 wird ersichtlich, dass die Bodentypenklassen der Braunerden, Podsole, Pseudogleye und Gleye zu mehr als 90 % die standörtlichen Bodentypen der Ackerflächen repräsentieren. Aus jeder dieser Bodentypenklassen wurde der Bodentyp mit der größten flächenhaften Verbreitung als die Klasse repräsentierender Bodentyp ausgewählt. Die Humusgehalte der ausgewählten Standorte lagen zwischen ca. 1 und 3 %.

Insgesamt wurden die Modellierungen somit durchgeführt für die Fruchtfolgen der Referenzflächen:

- TB08: CCM - Wintergerste + ZF - CCM + ZF - Kartoffeln + ZF - Körnermais
- TB15: Wintergerste - Feldgras - Feldgras - Wintergerste - Silomais
- TB63: Silomais - Roggen - Roggen + Zwischenfrucht - Silomais - Wintergerste

sowie drei definierte Musterfruchtfolgen

- Körnermais - Silomais - Feldgras
- Silomais - Wintergerste - Feldgras
- Silomais - Körnermais - Roggen.

Die Modellierungen wurden durchgeführt für den Zeitraum 1961 - 2100 mit den Klimadaten des CLM-Modellaufes CLM2 (siehe Kap. 3). Der Schwerpunkt der Auswertungen wurde - wie in Kap. 4.1 beschrieben - auf die Parameter „Entwicklung der Nitratkonzentration im Sickerwasser“ und „Bodenwasserhaushaltsdefizit“ bzw. „Bewässerungsbedarf“ gelegt. Hierzu wurden für die einzelnen Modellläufe die Mittelwerte dieser Bewertungsgrößen für die drei mit einander zu vergleichenden Zeiträume „Referenzzeitraum (1961 - 1990)“, „Nahe Zukunft (2021 - 2050)“ sowie „Ferne Zukunft (2071 - 2100)“ gebildet und einander gegenübergestellt.

Abbildung 15 zeigt exemplarisch am Beispiel der Referenzfläche TB08 und der hier praktizierten 5-jährigen Fruchtfolge die Entwicklung der N-Auswaschung in $\text{kg}/(\text{ha} \cdot \text{a})$ sowie die daraus resultierende Nitratkonzentration im Sickerwasser. Dargestellt sind jeweils die jährlichen bzw. 5-jährlichen (Fruchtfolgezeitraum) Mittelwerte. Die starken Schwankungen bei der Darstellung der jährlichen Mittelwerte sind Fruchtfolgeeffekte, die sich mit jeder Wiederholung der Fruchtfolge wiederholen. Die 5-jährige Mittelwertbildung zeigt einen ruhigeren Verlauf der Parameterentwicklung. Die mittleren jährlichen N-Auswaschungen liegen bei diesem Standort bei ca. 50 $\text{kg N}/\text{ha}$, die resultierenden Nitratkonzentrationen bei ca. 75 mg/l . Zwar ergeben sich auch zwischen den einzelnen Fruchtfolgewedderholungen nicht unerhebliche Schwankungen, ein Trend zu generellen, im Zeitverlauf zu- oder abnehmenden Werten ist jedoch nicht zu erkennen. Die Modellierung derselben Fruchtfolge auf anderen Standorten kommt zu vergleichbaren Ergebnissen.

In Abbildung 16 sind beispielhaft für die Musterfruchtfolge „Silomais-Körnermais-Roggen“ die modellierten Nitratkonzentrationen im Sickerwasser als Mittelwerte für die jeweils 30-jährigen Betrachtungszeiträume „Referenzzeitraum (1961 - 1990)“, „Nahe Zukunft (2021 - 2050)“ und „Ferne Zukunft (2071 - 2100)“ bei unterschiedlichen Standortbedingungen dargestellt. Auch hier zeigt sich im Vergleich dieser drei Zeiträume, dass weitgehend unabhängig von den im Untersuchungsgebiet vorhandenen Standortbedingungen allein durch die projizierten klimatischen Rahmenbedingungen kein signifikanter Einfluss auf die resultierende Nitratkonzentration im Sickerwasser zu erkennen ist. Diese Aussage gilt auch für die anderen modellierten Fruchtfolgen und Bewirtschaftungsbedingungen. Generelle, durch den Klimawandel verursachte Trends zu zu- oder abnehmenden Nitratkonzentration im Sickerwasser sind bei (den hier unterstellten) gleichbleibenden Bewirtschaftungsbedingungen nicht festzustellen. Eine Ausnahme, die sich aber nicht in allen modellierten Fruchtfolgen wiederfindet, stellt der Standort der lehmig-sandigen Humusbraunerde dar (Abbildung 16), der sich neben einem höheren Feinkornanteil vor allem durch einen höheren

Humusgehalt (3 %) auszeichnet. Hier zeigt sich im Vergleich zu den anderen beiden Betrachtungszeiträumen im Mittel des Zeitraumes 2071 - 2100 („Ferne Zukunft“) eine z. T. deutlich erhöhte Nitratkonzentration im Sickerwasser. Ursächlich lässt sich dieser Anstieg gut durch die erhöhten Temperaturen in der fernen Zukunft (siehe Abbildung 9) und einer verstärkten Mineralisation und N-Freisetzung aus dem organischen Bodenpool erklären. Allerdings zeigt sich dieser Trend erhöhter Nitratkonzentration im Sickerwasser unter diesem Standort nicht in allen modellierten Fruchtfolgen.

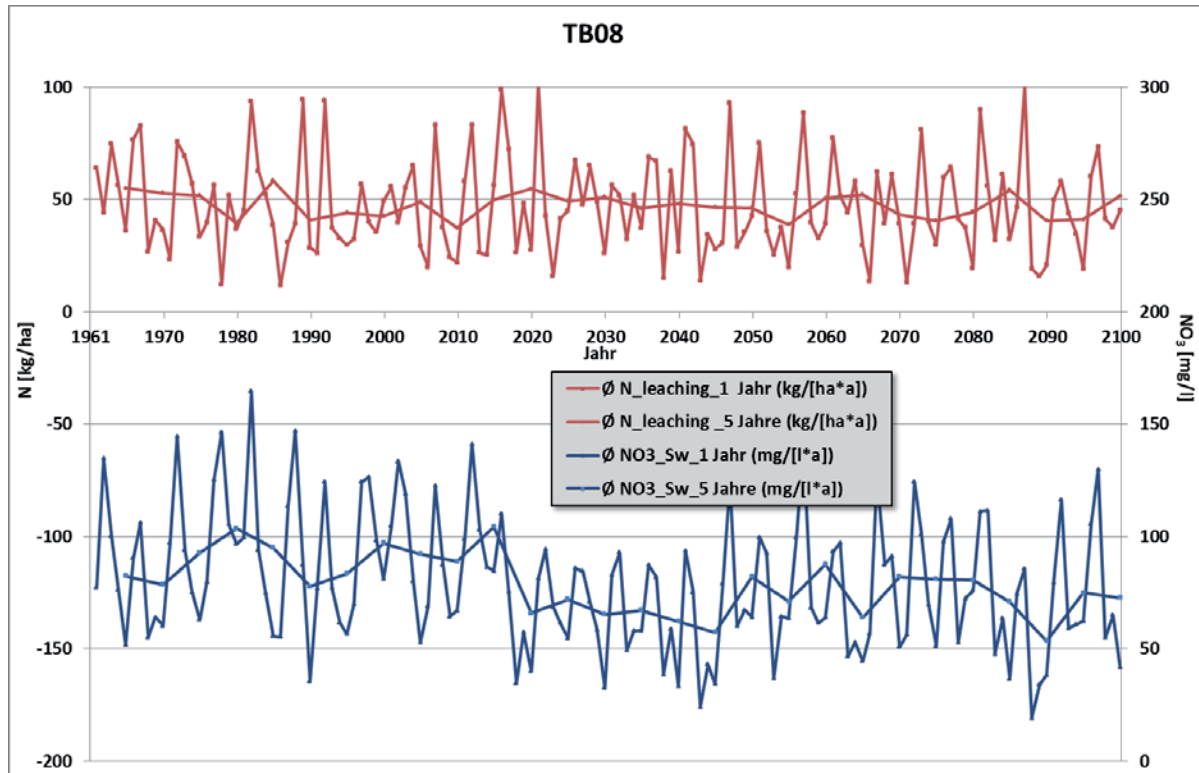


Abbildung 15: modellierte Entwicklung der N-Auswaschung und der Nitratkonzentration im jährlichen und 5-jährlichen Mittel am Beispiel der Referenzfläche TB08 von 1961 - 2100

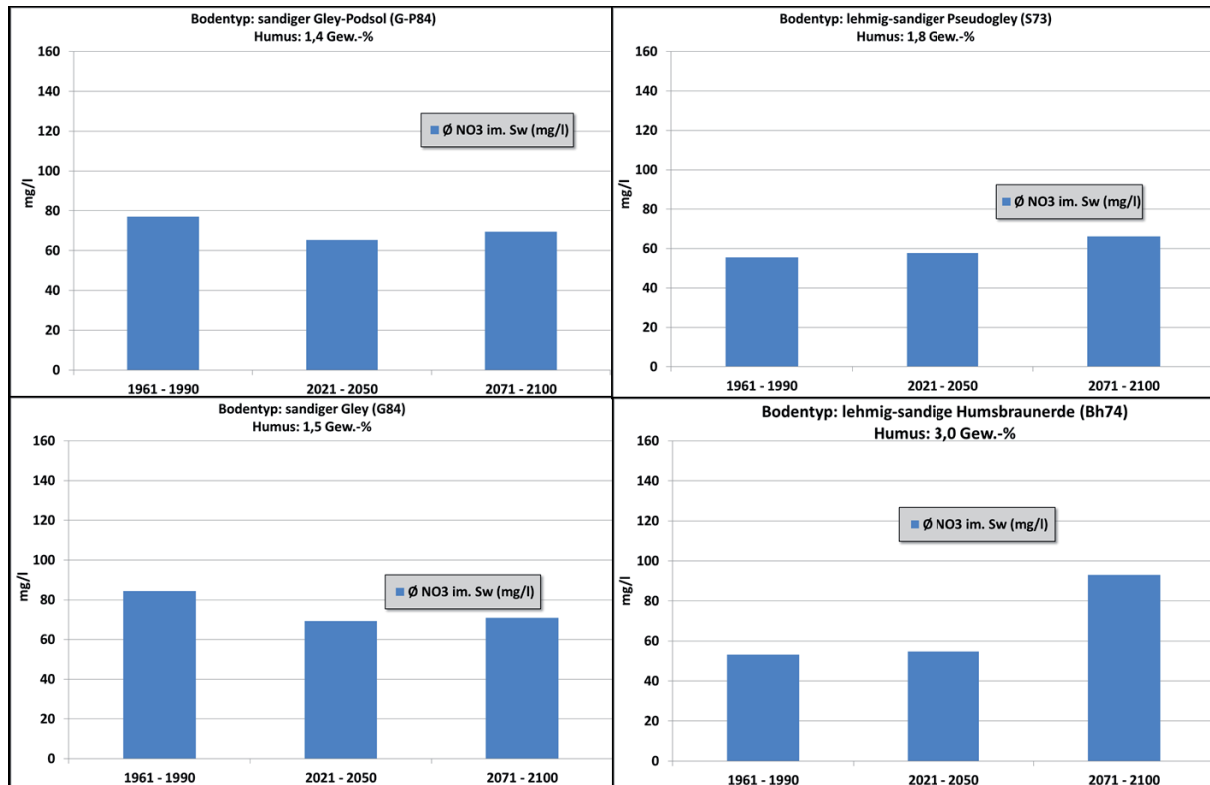


Abbildung 16: Fruchtfolge Silomais (SM)-Körnermais (KM)-Roggen (Ro): Mittelwerte der (modellierten) Nitratkonzentration im Sickerwasser in den drei Betrachtungszeiträumen unter verschiedenen Standorten

Im Vergleich zu den in den Untersuchungen von Drechsler (2007, 2009) tatsächlich im Untersuchungsgebiet gemessenen Nitratkonzentrationen im Sickerwasser von durchschnittlich 100 mg/l, liegen die modellierten Nitratkonzentrationen wie sie beispielhaft in Abbildung 16 wiedergegeben sind, in der Größenordnung aber auch für die weiteren modellierten Fruchtfolgen gelten (ca. 70 - 80 mg/l), um ca. 20 - 30 % niedriger.

Die Ursache hierfür wird bei den in CANDY verwendeten Eingangsdaten zu Standort und vor allem zur Bewirtschaftung vermutet. So wurden wie weiter oben ausgeführt die Bewirtschaftungsparameter für die berechneten Musterfruchtfolgen in Absprache mit der Landwirtschaftskammer NRW entsprechend ihren Beratungsempfehlungen definiert. Bei der tatsächlich im Untersuchungsgebiet praktizierten Bewirtschaftungsintensität und den hohen Viehbesatzdichten kann jedoch vermutet werden, dass das auf den Flächen praktizierte Düngungsniveau zumindest fallweise auch deutlich oberhalb der Düngungsempfehlungen der Landwirtschaftskammer liegt. Am Beispiel einiger Modellläufe wurden daher die Konsequenzen einer erhöhten N-Düngung für die unter diesen Flächen entstehenden Nitratkonzentrationen im Sickerwasser überprüft.

Die Ergebnisse in Abbildung 17 zeigen am Beispiel der Musterfruchtfolge „Silomais-Körnermais-Roggen“ und für den Bodentyp Gley-Podsol die Modellergebnisse zu den Konsequenzen einer um ca. 20 % erhöhten N-Düngung für die resultierende Nitratkonzentrationen im Sickerwasser. Die gesteigerte N-Düngung konnte nur zum Teil in Ertrag umgesetzt werden, mit der Folge dass die mittleren Nitratkonzentrationen im Sickerwasser auf ca. 100 mg/l anstiegen, und damit in etwa das tatsächlich vor Ort gemessene Niveau der Nitratkonzentration im Sickerwasser erreichen. Aber auch in diesen bezüglich der N-Düngung intensivierten Modellvarianten konnte kein eindeutiger Trend zu klimabedingten zunehmenden Nitratkonzentrationen im Sickerwasser nachgewiesen werden.

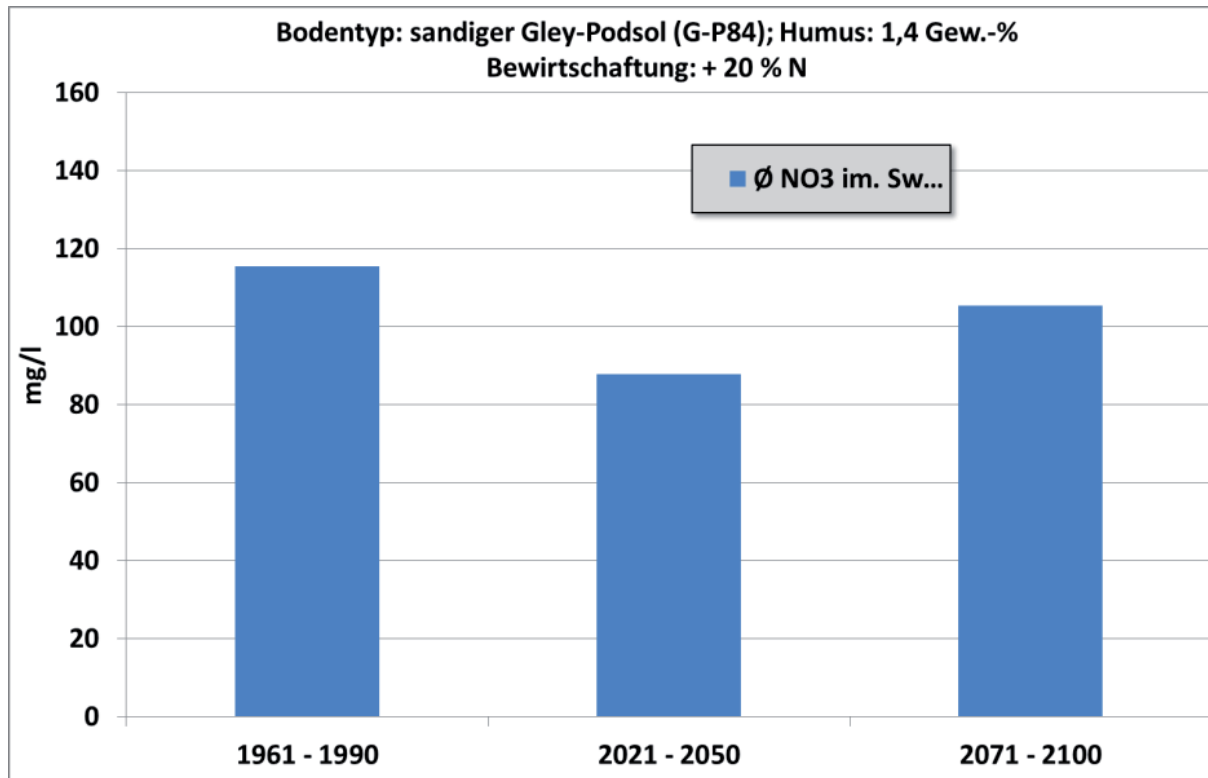


Abbildung 17: Fruchtfolge Silomais (SM)-Körnermais (KM)-Roggen (Ro) bei 20%iger Erhöhung der N-Düngung : Mittelwerte der (modellierten) Nitratkonzentration im Sickerwasser in den drei Betrachtungszeiträumen

Insgesamt ist hinsichtlich der Modellergebnisse zum N-Austrag somit festzuhalten, dass - bei unterstellten gleichbleibenden Bewirtschaftungsbedingungen - durch die Änderung der projizierten klimatischen Rahmenbedingungen im Vergleich der Mittelwerte der drei Betrachtungszeiträume („Referenzzeitraum“, „Nahe Zukunft“ und „Ferne Zukunft“) für die überwiegende Zahl der Standorte im Projektgebiet kein genereller Trend zu zu- oder abnehmenden Nitratkonzentrationen im Sickerwasser festzustellen war. Eine auf Klimaeinflüsse zurückzuführende Tendenz zu erhöhten Nitratkonzentrationen zeichnete sich lediglich unter Standorten mit höheren Humusgehalten ab, diese war aber nicht unter allen modellierten Fruchtfolgen festzustellen.

4.3 Modellergebnisse zum Bodenwasserhaushalt für den Zeitraum 1961 - 2100

Deutlich andere Trends zeichnen sich bei den Entwicklungen des Bodenwasserhaushaltes und ihre Bedeutung für zukünftige Bewässerungsansprüche unter Klimawandelbedingungen ab.

Abbildung 18 zeigt für die auf der Referenzfläche TB08 angebaute Fruchtfolge die (modellierte) Entwicklung des Bodenwasserhaushaltes in der Zeitreihe von 1961 - 2100 sowie die Zeiträume, in denen der Bodenwassergehalt die Bewässerungsschwelle von < 40 nFK unterschreitet. Bereits in dieser Darstellung ist zu erkennen, dass die Dichte dieser Zeiträume und damit der Bewässerungsbedarf etwa ab 2050 zunimmt.

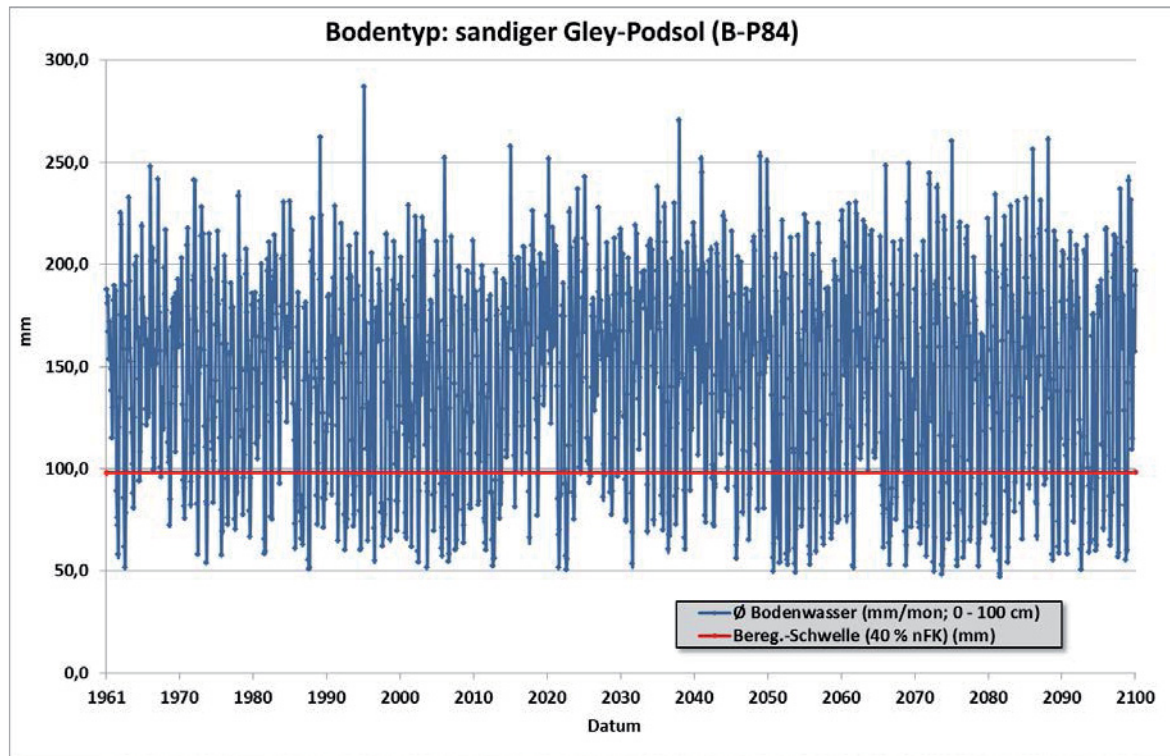


Abbildung 18: Referenzfläche TB63: mittlerer monatlicher Wassergehalt (in mm bis 100 cm Tiefe) von 1961 - 2100

Fasst man für die Jahre 1961 -1990, 2021 - 2050 und 2071 - 2100 und für die Zeiträume der Unterschreitung des Bodenwassergehaltes von < 40 nFK die jährlichen Summen der Differenzen von potenzieller und aktueller Evapotranspiration in einem Mittelwert zusammen, so ergibt sich der daraus für verschiedene Standorttypen (näherungsweise) abgeleitete Beregnungsbedarf (Abbildung 19).

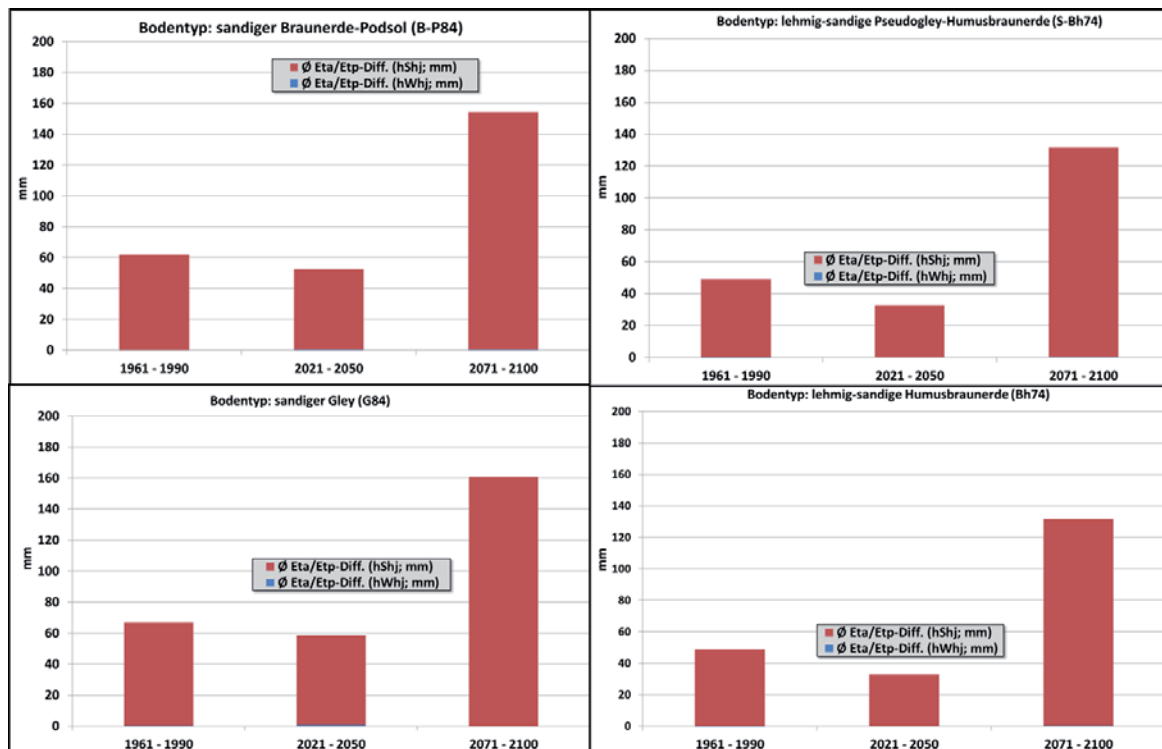


Abbildung 19: Referenzfläche TB63: mittlerer jährlicher Bewässerungsbedarf im Vergleich der drei Zeiträume „Referenzzeitraum (1961 - 1990)“, „Nahe Zukunft (2021 - 2050)“ und „Ferne Zukunft (2071 - 2100)“.

Die Darstellung zeigt deutlich, dass insbesondere im Zeitraum der „Fernen Zukunft (2071 - 2100)“ die Bewässerungsansprüche landwirtschaftlicher Nutzflächen deutlich zunehmen werden. Dieser Zusammenhang findet sich in den durchgeführten CANDY-Modellierungen auch über alle berechneten Bewirtschaftungs- und Standortvarianten. Wenngleich auch für diese Darstellung zunächst gelten muss, dass die tatsächliche Durchführung von Bewässerungsmaßnahmen wiederum von der ökonomisch geprägten, kulturspezifischen Bewässerungswürdigkeit abhängig ist, so kann doch bei der hier ausgewiesenen Größenordnung eines Bewässerungsbedarfes davon ausgegangen werden, dass diese in aller Regel auch gegeben sein wird. Insgesamt kommen alle durchgeführten Modellierungsvarianten zu dem Ergebnis, dass im Durchschnitt der jeweiligen Betrachtungszeiträume der mittlere jährliche Bewässerungsanspruch im Zeitraum von 1961 - 1990 und 2021 - 2050 in einer Größenordnung von ca. 30 - 50 mm liegt, im Zeitraum von 2071 - 2100 aber auf einen Betrag von ca. 100 - 150 mm zunehmen wird. Die Bewertung dieser zu erwartenden Zunahme von Bewässerungsansprüchen deckt sich auch sehr gut mit den mit anderen Modellverfahren errechneten Zahlen, wie sie in Barein et al. (2013) beschrieben werden.

Wie die Ergebnisse weiterer Teilprojekte in *dynaklim* zeigen, resultieren aus diesen erhöhten Bewässerungsansprüchen bei ihrer tatsächlichen Umsetzung sowohl qualitative als auch quantitative Konsequenzen für die Grundwasserressourcen. Zum einen würde durch eine Entnahme von Beregnungswässern aus dem Grundwasserleiter in dieser Größenordnung der Grundwasserspiegel sinken, das Einzugsgebiet der Trinkwassergewinnung Üfter Mark würde sich vergrößern und der grundwasserbürtige Abfluss in Fließgewässer würde sich verringern (Barein et al. 2013). Zum anderen würde die zusätzliche Ausbringung von N-Frachten mit dem Beregnungswasser zu einem erhöhten N-Austrag und damit zu erhöhten Nitrat-Konzentrationen im Grundwasser führen, wenn diese mit dem Beregnungswasser ausgebrachten N-Frachten in der Düngeplanung nicht berücksichtigt werden (Kübeck et al. 2013).

5 Fazit und kritische Betrachtung der Modellergebnisse

Für das Wassergewinnungsgebiet Üfter Mark der RWW Rheinisch-Westfälischen Wasserwerksgesellschaft mbH wurden mit dem Modell CANDY die Umsatz- und Transportprozesse in landwirtschaftlich genutzten Böden modelliert. Insbesondere wurden die Parameter Stickstoff und Kohlenstoff sowie der Bodenwasserhaushalt betrachtet. Am Beispiel von Modellläufen für drei Referenzflächen, für die sowohl die genauen Bewirtschaftungsdaten als auch Messwerte zur N-Verlagerung vorlagen und unter Berücksichtigung der standörtlichen Daten zu Bodenaufbau und Klima, wurden die Modell-spezifischen Parametereinstellungen vorgenommen bis die Ergebnisse der einzelnen Modellläufe die vor Ort tatsächlich gemessenen Werte zur N-Verlagerung mit hinreichender Genauigkeit wiedergaben.

Die Modellierung des Klimaeinflusses auf den Bodenwasserhaushalt und die Stoffverlagerung unter landwirtschaftlichen Nutzflächen im Projektgebiet erfolgte für den Zeitraum 1961 - 2100 mit dem im Rahmen von *dynaklim* zur Verfügung gestellten Daten der CLM-Klimaprojektionen (CLM 2). Hierzu wurden für den Modellzeitraum 1961 - 2100 die Fruchtfolgen der Referenzflächen (und deren Bewirtschaftungsmaßnahmen) in den Modellläufen iterativ wiederholt. Die resultierenden Ergebnisse insbesondere zum N-Austrag sowie zum Bodenwasserhaushalt und den daraus abgeleiteten Bewässerungsansprüchen wurden für die drei Betrachtungszeiträume „Referenzzeitraum 1961 - 1990“, „Nahe Zukunft 2021 - 2050“ sowie „Ferne Zukunft (2071-2100)“ in Mittelwerten zusammengefasst und miteinander verglichen. Gleiches erfolgte mit drei weiteren zusammengestellten Musterfruchtfolgen, die mit der Landwirtschaftskammer NRW abgestimmt und für das Projektgebiet als typisch erachtet wurden. Alle Modellläufe wurden jeweils durchgeführt für 5 - 6 für das Projektgebiet typische bzw. repräsentative Standortbereiche unterschiedlicher bodentypologischer Ausprägung.

Die Modellierungen kommen einerseits zu dem Ergebnis, dass mit dem Modell CANDY bei genauer Kenntnis der standörtlichen, klimatischen und bewirtschaftungsspezifischen Gegebenheiten der tatsächliche N-Austrag unter den modellierten Flächen und den hier berücksichtigten landwirtschaftlichen Kulturen (Ausnahme: Feldgras) mit hinreichender Genauigkeit abzubilden ist. Bei Zugrundelegung der aktuellen Fruchtfolgen und Bewirtschaftungsmaßnahmen konnte für die betrachteten Standorte unter den prognostizierten Klimawandelbedingungen weit überwiegend im Vergleich der Mittelwerte der 30-jährigen Betrachtungszeiträume keine signifikante Veränderung des N-Austrages festgestellt werden. Eine Tendenz zu erhöhten N-Austrägen in der fernen Zukunft zeichnete sich jedoch in einzelnen Modellläufen ab für die ferne Zukunft (2071 - 2100) und für Standorte mit erhöhten Humusgehalten ($\geq 3\%$). Ursächlich lässt sich dies auf höhere Mineralisierungsraten aus dem Kohlenstoffpool des Bodens auf Grund der in diesem Zeitraum deutlich erhöhten Durchschnittstemperaturen zurückführen.

Für die hier modellierten Fruchtfolgen sind jedoch signifikante Zunahmen der Bewässerungsansprüche in der fernen Zukunft zu erwarten. Während diese für den Zeitraum 1961 - 1990 zw. 2021 - 2050 etwa in einer Größenordnung von ca. 30 - 50 mm/a liegen, steigen sie in der fernen Zukunft (2071 - 2100) auf ca. 100 - 150 mm/a an. Die Ergebnisse aus weiteren *dynaklim*-Teilprojekten haben gezeigt, dass sich hieraus einerseits quantitative Konsequenzen (Senkung des Grundwasserspiegels, Vergrößerung des Trinkwassereinzugsgebietes, verringerter Basisabfluss) für die Grundwasserressourcen ergeben (Barein et al. 2013). Andererseits führen die mit dem Beregnungswasser zusätzlich aufgebrauchten N-Frachten zu einer deutlichen Erhöhung des N-Austrages unter diesen Flächen und damit zu erhöhten Nitrat-Konzentrationen im Grundwasser, wenn diese nicht bei der Düngungsbemessung berücksichtigt werden (Kübeck et al. 2013).

Deutlich herausgestellt werden muss jedoch, dass für die im Rahmen der hier vorgestellten Untersuchung durchgeführten Modellierungen von gleichbleibenden Bewirtschaftungsbedingungen ausgegangen wurde. Tatsächlich verändert sich die landwirtschaftliche Bewirtschaftungspraxis jedoch permanent, und über den hier betrachteten Zeitraum bis ins Jahr 2100 werden diese Änderungen auch erheblich sein. Eine belastbare Prognose, in welche Richtung sich diese Änderungen tatsächlich bewegen werden, ist jedoch nicht möglich. So wird die landwirtschaftliche Bewirtschaftungspraxis und das daraus resultierende Stoffaustragsgeschehen neben dem Klima von vielen weiteren Einflussfaktoren bzw. Wechselwirkungen geprägt, wie z. B. ökonomische und politische Rahmenbedingungen, Zuchtfortschritt der angebauten Kulturpflanzen, Etablierung neuer Kulturpflanzen etc.

Die Untersuchungsergebnisse zeigen jedoch, dass unter den gegebenen Bedingungen des Projektgebietes im nordwestlichen Münsterland allein durch veränderte klimatische Bedingungen nicht mit erhöhten N-Austrägen (mit Ausnahme der Böden mit erhöhten Humusgehalten), sehr wohl aber mit einer Zunahme der Bewässerungsansprüche zu rechnen sein wird. Der Einsatz eines DV-Systems wie CANDY zur Modellierung des Stoff- und Wasserhaushaltes eines Bodens erlaubt - nach entsprechender Anpassung der Modellparameter an das Untersuchungsgebiet - bei sich abzeichnenden Änderungen der Bewirtschaftung deren Konsequenzen für den Stoffaustrag bzw. den Bodenwasserhaushalt vorwegzunehmen bzw. diese durch verschiedene Bewirtschaftungsvariationen zu optimieren.

LITERATURVERZEICHNIS

Barein Anika, Werner Florian, Meßer Johannes, Fohrmann Reinhard (2013): Prognose der Auswirkungen des Klimawandels auf das Grundwasser mit Hilfe eines Grundwasserströmungsmodells am Beispiel der RWW-Wassergewinnung Üfter Mark. *dynaklim*-Publikation Nr. 42. www.dynaklim.de.

Dahlhoff, Arne (2013): Biogas in Nordrhein-Westfalen - Auswertung der Biogasanlagen-Betreiberdatenbank der Landwirtschaftskammer NRW, Stand 20.5.2013. <http://www.landwirtschaftskammer.de/landwirtschaft/technik/biogas/pdf/biogas-in-nrw-2013.pdf> (Download: 12.8.2013).

Drechsler, Hartwig (2007): Forschungsprojekt Erle - Ursachen, Differenzierung und Steuerung der Nitratkonzentration im Grundwasser des Wassereinzugsgebietes „Üfter Mark“ der RWW. Gutachten im Auftrag der RWW Rheinisch-Westfälische Wasserwerksgesellschaft mbH, unveröffentlicht.

Drechsler, Hartwig (2009): Forschungsprojekt Heiden - Grundwasserschutz-bezogene Standortaufnahme mit Erkundung der Nitratkonzentration in der Sickerwasser-Zone und Ermittlung der „standortbezogenen Grundwasserschutz-Priorität“. Gutachten im Auftrag der RWW Rheinisch-Westfälische Wasserwerksgesellschaft mbH, unveröffentlicht.

Drechsler, Hartwig (2010): Monitoring zu den Humusgehalten und zum Stickstoff-Mineralisationspotenzial von Oberböden unter Ackernutzung in den Kooperationsgebieten Borken und Recklinghausen im Wasserschutzgebiet Holsterhausen / Üfter Mark. Gutachten im Auftrag der RWW Rheinisch-Westfälische Wasserwerksgesellschaft mbH, unveröffentlicht.

Fohrmann, Reinhard (2013): Risikopotenziale der Biogasproduktion für die Wasserwirtschaft. *KW Korrespondenz Wasserwirtschaft* (6), Nr. 2.

Franko, U., Oelschlägel, B. & Schenk, S. (1995): Simulation of temperature-, water- and nitrogen dynamics using the model CANDY. *Ecological Modelling*, 81, 213-222.

Herzberg, Angela (2001): Wasserschutzgebiet und Kooperation Holsterhausen / Üfter Mark aus Sicht des Wasserversorgers. *RWW Fachberichte*. Eigenverlag.

IT.NRW Landesbetrieb Information und Technik NRW (2011): Ergebnisse der Agrarstrukturerhebung bzw. Landwirtschaftszählung aus dem Jahr 2010.

Kübeck C., Bergman, A., Herzberg, A. (2013): Modellierung und Prognose der durch den Klimawandel verursachten Änderungen der Wasserquantität und -qualität. www.dynaklim.de.

Losen, H. & B. Konrads (1998): Wasserwirtschaftliche und ökologische Aspekte bei der Nutzung flurnaher Grundwasservorkommen für die Trinkwassergewinnung in den Halterner Sanden, dargestellt am Beispiel der Brunnengalerie Üfter Mark der RWW. Gutachterliche Ausarbeitung des Hydrogeologischen Büros Dr. Losen, Köln.

LWK NRW Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen, Kreisstelle Borken (2012a): persönliche Mitteilung von Frau Dr. Vormann.

LWK NRW Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen (2012b): Ratgeber Pflanzenbau und Pflanzenschutz, Ausgabe 2012. Eigenverlag.

Quirnbach Markus, Freistühler Elke, Papadakis Ioannis (2012): Auswirkungen des Klimawandels in der Emscher-Lippe-Region - Analysen zu den Parametern Lufttemperatur und Niederschlag. *dynaklim*-Publikation Nr. 30. www.dynaklim.de.

UBA Umweltbundesamt, DLR-DFD (2009): CORINE Land Cover (CLC 2006). (http://www.corine.dfd.dlr.de/intro_de.html).

Ansprechpartner

Jens Hasse
hasse@fiw.rwth-aachen.de

Michaela Stecking
stecking@fiw.rwth-aachen.de

Projektbüro *dynaklim*

Mozartstraße 4
45128 Essen

Tel.: +49 (0)201 104-33 39

www.dynaklim.de