Schlussbericht

Sicherung der Futter- und Lebensmittelwarenkette bei bio- und agro-terroristischen Schadenslagen

Arbeitspaket 3: Strukturen, Ökonomie und Simulation

Zuweisungsempfänger: FLI Wusterhausen

Förderkennzeichen: 13N11208

Vorhabenbezeichnung: Silebat

Laufzeit des Vorhabens: 10/2010 bis 12/2013 (kostenneutrale Verlängerung)

Autor: Prof. Dr. Thomas Selhorst

Kurzdarstellung zu

1. Aufgabenstellung

Lebensmittel Warenketten können Ziel von bio- agro-terroristischen Angriffen sein, wobei zwei Szenarien zu unterscheiden sind: a) mit dem Abgriff soll die Infrastruktur der Warenkette ganz oder teilweise zerstört werden, um die Nahrungsmittelversorgung der Verbraucher zu beeinträchtigen, b) die Lebensmittel-Warenkette wird als Vehikel benutzt, um Erreger an den Endpunkt der Kette, den Verbraucher zu bringen. AP3 bearbeitete Punkt b) und fokussierte auf die Primärproduktion von Fleisch und Milcherzeugnissen.

Die Produktion in Deutschland erfolgt in hochspezialisierten Betrieben. Aufgrund der Spezialisierung ist ein Transport von Produkten zwischen den Betrieben, den Gliedern der Produktionskette, erforderlich. Der Transport von Produkten zwischen Betrieben der Produktionskette erzeugt ein zeitlich veränderliches Handelsnetz und dieses kann zu einer schnellen und im ungünstigsten Fall globalen Verbreitung von Agentien führen.

Die Aufgabe von AP3 bestand darin, virulente und vulnerable Knoten des Handelsnetzes zu identifizieren. Die Virulenz eines Betreibe definieren wir als die Anzahl der Betriebe, die von einem Ausgangsbetrieb erreicht werden kann. Im Gegensatz dazu ist die Vulnerabilität eines Betriebes die Anzahl der Betriebe des Netzwerkes, die den betrachteten Betrieb erreichen können. Virulente Betriebe können lohnende Ziele eines bio- agro- terroristischen Anschlags sein. Vulnerable Betriebe können als Sentinel-Knoten für die Überwachung genutzt werden. Handelsnetzwerke bestehen aus Konten und Konten, wobei im vorliegenden Fall die Betriebe der Warenkette die Knoten und die Bewegung von Waren (landwirtschaftlichen Nutztieren) zwischen den Knoten die Kanten des Netzwerkes darstellen. Der Fluss von Waren zwischen den Knoten ist nicht kontinuierlich sondern diskret und die Kanten werden täglich an- und ausgeschaltet. Das Handelsnetz ist zeitdynamisch. Agentien werden zwischen den Knoten des Netzes über die Kanten ausgetauscht. Untersucht man die Verbreitung von Agentien auf dem Handelsnetz ausgehend von einem Ausgangsknoten, stellt man Unterschiede in der Virulenz und der Vulnerabilität der Knoten fest.

Neben der Auswahl von Knoten als Ziel eines bio- agro-terroristischen Anschlags wurde für die Warenkette Milch untersucht, wie sich eine Kombination von Knoten auf die Schadenslage auswirkt. Die Auswahl erfolgte nach ökonomischen Gesichtspunkten, in dem mit einer möglichst geringen Anzahl von Ausgangsknoten ein maximaler Schaden erzielt werden sollte.

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Am Institut für Epidemiologie des Friedrich-Loeffler Instituts Wusterhausen wurde 2008 eine interdisziplinäre, wissenschaftliche Arbeitsgruppe etabliert, die sich mit Fragen der Ausbreitung von Agentien auf Handelsnetzen beschäftigt hat. Zum Start des SiLeBAT Projektes konnte auf die erarbeitete Expertise der Arbeitsgruppe aufgebaut werden.

3. Planung und Ablauf des Projektes

Handelsnetze kann man statisch und dynamisch betrachten. Bei der statischen Betrachtung von Handelsnetzen werden die Handelsaktivitäten zwischen den Knoten des Netzes für einen gegebenen Zeitraum akkumuliert, was dazu führt, dass alle in dem Betrachtungszeitraum zwischen zwei Knoten eines Handelsnetzes auftretenden Kanten zu einer Kante zusammengezogen werden. Durch diese Vorgehensweise geht die dem dynamischen Netz eigene Chronologie verloren. Hinsichtlich der Ausbreitung von Agentien auf Handelsnetzen ist die Chronologie der Ereignisse aber entscheidend. Der Fokus der Arbeiten im AP3 lag dementsprechend auf der Entwicklung und Anwendung von Methoden zur Analyse und Modellierung dynamischer Netzwerke. Es wurden sowohl mathematisch-analytische Modelle als auch Simulationsmodelle entwickelt. Mit den erstellten Simulationsmodellen kann auch die räumliche Dynamik einer Ausbreitungsdynamik abgebildet werden, da die geografische Lage der Knoten des Handelsnetzes näherungsweise ermittelt werden konnte.

Ein weiterer Schwerpunkt der Arbeit wurde auf die Modellierung von Kanten in Handelsnetzen bei unvollständigen oder fehlenden Informationen gelegt. Hier wurde ein gravity Modell für die Warenkette Milch entwickelt, das die Wahrscheinlichkeit einer Kante zwischen zwei Knoten in Abhängigkeit von der geografischen Entfernung und in Abhängigkeit von Angebot und Nachfrage bestimmt.

4. Wissenschaftlicher Kenntnisstand benutzte Informations- und Dokumentations- Dienste

AP3 baute auf den jeweils aktuellen wissenschaftlichen Kenntnisstand der Netzwerkanalyse aufgebaut und hat wissenschaftlich anerkannte Beiträge zur Weiterentwicklung der Netzwerktheorie geleistet. Folgende Arbeiten waren für die Bearbeitung relevant:

Albert, R. and Barabási, A.-L. (2002). Statistical mechanics of complex networks. Rev. Mod. Phys., 74:47–97.

Bajardi, P., Barrat, A., Natale, F., Savini, L., and Colizza, V. (2011). Dynamical patterns of cattle trade movements. PLOS ONE, 6(5):e19869.

Christley, R., Robinson, S. E., Lysons, R., and French, N. P. (2005). Network analysis of cattle movement in Great Britain. In Proc. Soc. Vet. Epidemiol. Prev. Med., pages 234–244. Society for Veterinary Epidemiology and Preventive Medicine.

Colizza, V., Pastor-Satorras, R., and Vespignani, A. (2007). Reaction-diffusion processes and metapopulation models in heterogeneous networks. Nat. Phys., 3(4):276–282.

Colizza, V. and Vespignani, A. (2007). Invasion threshold in heterogeneous metapopulation networks. Phys. Rev. Lett.

Hethcote, H. W. (2000). The mathematics of infectious diseases. SIAM Rev., 42(4):599–653.

Holme, P., Kim, B. J., Yoon, C. N., and Han, S. K. (2002). Attack vulnerability of complex networks. Phys. Rev. E, 65(5):056109.

Holme, P. and Saramäki, J. (2012). Temporal networks. Phys. Rep., 519(3):97–125.

Keeling, M. J., Danon, L., Vernon, M. C., and House, T. A. (2010). Individual identity and movement networks for disease metapopulations. Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A., 107(19):8866–8870.

Keeling, M. J. and Eames, K. T. D. (2005). Networks and epidemic models. J. R. Soc. Interface, 2(4):295–307.

Newman, M. E. J. (2010). Networks: An Introduction. Oxford University Press, New York, NY, USA.

Pastor-Satorras, R. and Vespignani, A. (2001). Epidemic dynamics and endemic states in complex networks. Phys. Rev. E, 63:066117.

Pastor-Satorras, R. and Vespignani, A. (2002a). Epidemic dynamics in finite size scalefree networks. Phys. Rev. E, 65:035108(R).

Pastor-Satorras, R. and Vespignani, A. (2002b). Immunization of complex networks. *Phys. Rev. E*, 65(3):036104.

AP3 verwendete als wesentliche Datenquelle zur Entwicklung der Methoden die HI-Tier Datenbank. HI-Tier ist eine nationale Datenbank, in der Tierbewegungen zwischen landwirtschaftlichen Betrieben und Unternehmen der Warenkette Milch und Fleisch auf Tagesbasis erfasst werden. bei Rindern erfolgt die Erfassung auf Einzeltierbasis und bei Schweinen auf der Basis von Losgrößen (Handelsvolumen). Ohne die Bereitstellung der Daten wären die vorgestellten Untersuchungen nicht in dem vorgestellten Umfang möglich gewesen.

Die Untersuchungen zur Warenkette Milch wurden durch das BVL (Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit unterstützt. Die beim BVL vorliegenden Daten zum Handel mit Milch und Milchprodukten wurden zur Erstellung der Handelsnetzes Milch verwendet.

Die Erstellung der Simulations- und Optimierungsprogramme erfolgte mit der Programmiersprache Python (https://www.python.org), die Analyse der Netzwerke mit der Bibliothek networkX (https://networkx.github.io/).

Eingehende Darstellung

1. der erzielten Ergebnisse im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der gesteckten Ziele

Warenkette Fleischproduktion

Agentien, die durch einen agro- bio- terroristischen Anschlag in die Warenkette eingebracht werden, können durch den Handel mit Gütern in kurzer Zeit über weite Distanzen verbreitet werden. Um Analysen zu raum- zeitliche Verbreitungsdynamik machen zu können, sind Kenntnisse über die Handelsaktivitäten notwendig. Diese Kenntnisse liegen vor. Seit 2001 wird in Deutschland die Tierbewegungs-Datenbank HI-Tier betrieben. In dieser Datenbank

sind alle Tierbewegungen zwischen Betrieben gespeichert. Diese Tierbewegungen standen als sogenannte Kantenlisten für mehrere Jahre für die Analysen zur Verfügung. Kantenlisten enthalten Informationen über den liefernden Betrieb, über den empfangenden Betrieb, die Anzahl der gehandelten Tiere und das Datum, an dem die Tiere gehandelt wurden.

Diese Daten müssen für die Analyse in einen Graphen überführt werden. Ein Graph besteht aus Knoten und Kanten. Die Knoten entsprechen den landwirtschaftlichen Betrieben und die Kanten stellen die Tierbewegungen zwischen den landwirtschaftlichen Betrieben dar. Die Kanten des Graphen sind gerichtet, weil die Tierbewegungen gerichtet ist; vom liefernden Betrieb zum empfangenden Betrieb.

Der erstellte Graph dient letztlich der Ableitung der Zentralitätsmaße. Zentralitätsmaße erlauben Aussagen über die Bedeutung einzelner Knoten und Kanten des Netzwerks, und es lässt sich prinzipiell anhand der Zentralitätsmaße die Bedeutung einzelner Knoten und Kanten des Netzwerkes hinsichtlich der Verbreitung von Agentien bestimmen.

Ausbreitungsprozesse sind Prozesse in Raum und Zeit; die zeitliche Komponente ist durch die zeitliche Abfolge der Handelskontakte und die räumliche Komponente durch die geographische Lage der Betriebe gegeben. Zentralitätsmasse sind nur für statische Graphen definiert. Ein statischer Graph akkumuliert die Kanten zwischen den Knoten eines Netzwerkes wie folgt. Zunächst wird ein Beobachtungszeitraum festgelegt, und für diesen Beobachtungszeitraum wird eine gerichtete Kante zwischen zwei Knoten des Graphen eingefügt, wenn mindestens einmal ein Transport von Tieren zwischen den beiden Knoten stattgefunden hat. Durch diese Vorgehensweise geht die Information über die zeitliche Abfolge der Handelskontakte verloren. Die Nichtberücksichtigung der Chronologie der Handelskontakte führt weiter dazu, dass der Graph Kanten enthält, die von der zeitlichen Abfolge her gesehen nicht möglich sind; der Graph enthält dadurch einen Überschuss von Kanten. Dies führt bei der Simulation der Ausbreitungsdynamik zu einer Überschätzung der Dynamik.
Dieser Befund führt zu einem Dilemma: für statische Graphen können Zentralitätsmaße berechnet werden, für dynamische Graphen nicht. Dynamische Graphen sind die adäquate Repräsentation von Handelsnetzen.

In AP3 wurde deshalb ein mathematisches Modell aufgestellt[1], mit dem die zeitliche Dynamik der beobachteten Handelsbeziehungen abgebildet werden kann. Anhand dieses Modells kann unter anderem der Überschuss an Kanten durch die Verwendung eines statistischen Netzwerkes im Vergleich zum dynamischen Netzwerk ermittelt werden. Anhand dieses Maßes kann beurteilt werden, ob eine statische Repräsentation des dynamischen Handelsnetzes möglich ist. Für die hier im Fokus stehenden Netzwerke der Fleischproduktion (Schwein und Rind) ist eine Überführung der dynamischen Netze in eine statische Repräsentation nicht zulässig, und die Zentralitätsmaße können nicht verwendet werden.

Die Bestimmung der relevanten Knoten erfolgte alternativ durch Szenario Analysen. Hierbei wird unter Beachtung der Chronologie der Handelskontakte nacheinander für alle Startknoten – das sind solche Knoten, die zu einem bestimmten Startzeitpunkt zumindest einen ausgehenden Handelskontakt haben – die Virulenz bestimmt. Parallel kann die Vulnerabilität der Zielknoten bestimmt werden

[1] Siehe hierzu auch H.Lentz Paths for Epidemics in Static and Temporal Networks, Dissertation HU Berlin, 2013. http://edoc.hu-berlin.de/dissertationen/lentz-hartmut-2013-11-06/METADATA/abstract.php?id=40377

Untersucht wurden worst case Szenarien. In diesen wurde angenommen, dass die betrachteten Knoten des Netzwerkes für einen vorgegebenen Zeitraum virulent bleiben. Virulenz und Vulnerabilität wurden für verschiedene Startzeitpunkte und verschiedene Dauern der Virulenz ermittelt. Mit den Szenarien Analysen wird ein Datensatz erzeugt, der folgende Frage beantworten hilft: Finden sich in den Simulationsergebnisse Knoten, die in allen Simulationsläufen eine hohe Virulenz und/oder Vulnerabilität haben?[2]

Die nachfolgende Abbildung 1 zeigt den Einfluss der Dauer der Virulenz auf die Wahrscheinlichkeit eines Ausbruchs (Anteil der Simulationsläufe in denen das Agens zumindest an einen Folgebetrieb übertragen wurde) und die Virulenz.

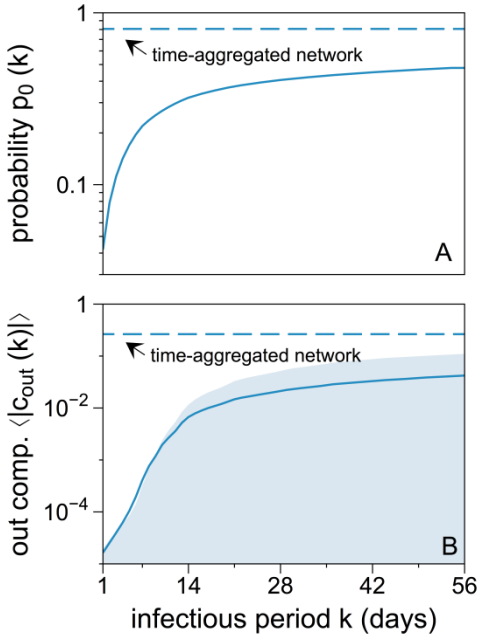


Abbildung 1: Einfluss der Dauer der Infektiösen Periode auf die Wahrscheinlichkeit für einen Ausbruch (A) und die Virulenz (B). In (B) zeigt die eingefärbte Fläche die Variabilität und die Linie den Median der Virulenz. Die Virulenz ist gegeben als Anteil an der Gesamtknotenzahl.

Abbildung 1 zeigt deutlich den Unterschied zwischen der statischen und dynamischen Betrachtung des Netzwerkes. Das dynamische Netzwerk kann nicht durch ein statisches (zeit aggregiertes) Netzwerk ersetzt werden. Die Ausbruchswahrscheinlichkeit und die Virulenz sind im statischen Netzwerk größer. Die statische Betrachtung führt zu einer Überschätzung.

[2] Siehe hierzu auch: Mario Konschake, Hartmut H. K. Lentz, Franz J. Conraths, Philipp Hövel, Thomas Selhorst On the Robustness of In- and Out-Components in a Temporal Network. *PloS One* 8 (2), e55223, 7, 2013. http://www.plosone.org/article/info%3Adoi%2F10.1371%2Fjournal.pone.0055223

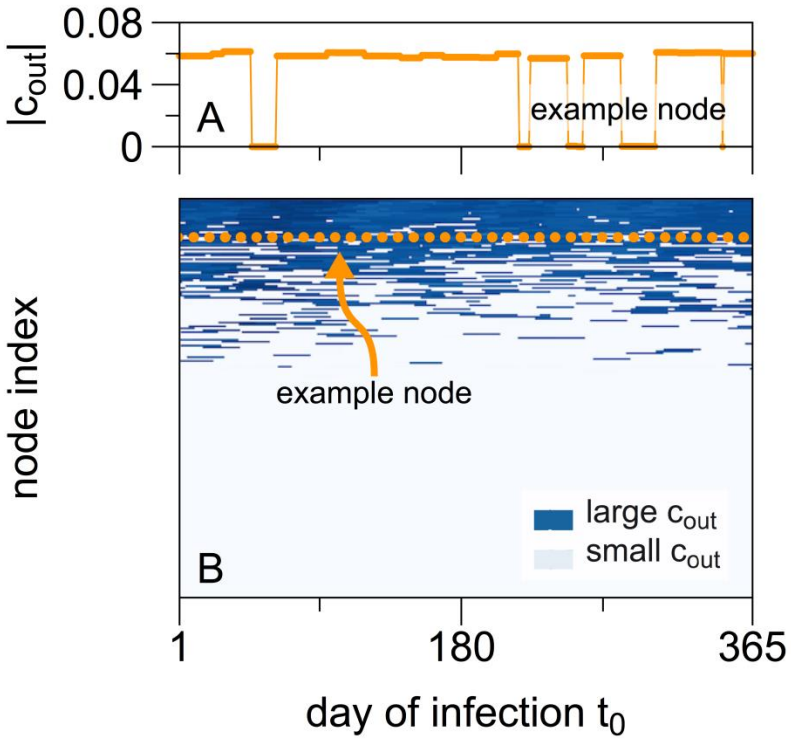


Abbildung 2 Einfluss des Zeitpunktes der Kontamination auf die Virulenz. (A) Exemplarisch für einen Knoten, (B) Alle Knoten rangiert nach Virulenz (cout). Die Virulenz ist gegeben als Anteil an der Gesamtknotenzahl.

Die statische Betrachtung kann die nichtlineare Abhängigkeit sowohl der Wahrscheinlichkeit von Folgekontaminationen als auch der Virulenz von der Dauer der Virulenz nicht widerspiegeln.
Die Untersuchungen konnten zeigen, dass die Rangierung der Knoten nach ihrer Virulenz bzw. Vulnerabilität für eine Vielzahl von Infektionsperioden stabil bleibt. Die identifizierten virulenten Betriebe sind geeignete Ziele für einen Angriff auf die Lebensmittelkette, die vulnerablen Betreibe eignen sich für die Überwachung.

Abbildung 2 zeigt den Einfluss des Zeitpunkts der Primärkontamination auf die Virulenz. Abbildung 2 (A) mach deutlich, dass der Zeitpunkt der Kontamination Einfluss auf die Virulenz hat. Der exemplarisch ausgewählte Knoten zeigt fast durchgängig eine hohe Virulenz; es gibt aber Kontaminationszeitpunkte, zu denen die Viruslenz Null ist. Abbildung 2 (B) zeigt die Virulenz für alle Knoten in Abhängigkeit vom Zeitpunkt der Kontamination (auf Grund der großen Datenmanege wurde nur jeder 100ste Knoten für die Erstellung der Grafik ausgewählt). Es wird deutlich, dass es erheblich Unterschiede zwischen den Knoten in der Virulenz in Abhängigkeit vom Zeitpunkt der Kontamination gibt. Ein Großteil der Knoten besitzt generell eine geringe Virulenz.

Für die Identifikation von Knoten, die robust sind gegenüber Veränderungen des Zeitpunktes der Kontamination und gegenüber Veränderungen in der Dauer der Virulenz und die deshalb als mögliche Ziele eines Angriffs auf die Lebensmittelkette in Frage kommen, interessiert die simulierte Virulenz (also die Anzahl der Folgekontaminationen) nicht. Vielmehr interessiert die Rangierung der Knoten, also die Identifikation der top-x Knoten, die robust sind und unter allen betrachteten Bedingungen (virulente Periode, Zeitpunkt der Kontamination) nahezu immer eine hohe Virulenz aufweisen. Die Untersuchungen zur Rangierung der Knoten wurden wie folgt durchgeführt. Variiert wurden der Zeitpunkt der Infektion und die Dauer der Virulenten Periode. Für eine virulente Periode wurde die für verschiedene Zeitpunkte der

Kontamination ermittelte Virulenz gemittelt. Abbildung 3 stellt die Ergebnisse dieser Untersuchung dar. Auf der x-Achse ist die Dauer der virulenten Periode dargestellt. Die y-Achse zeigt die Top100 Knoten über alle Dauern der Virulenten Periode und alle Startzeitpunkte der Kontamination. Abbildung 3 differenziert über die Dauer der virulenten Periode. Exemplarisch ist das Ranking eines Knotens rot eingefärbt. Die Top100 Knoten zeigen eine starke Variabilität im Ranking in Abhängigkeit von der Dauer der Virulenten Periode. Der ausgewählte Knoten kann unter den Rangplatz 800 abfallen. Generell zeigt sich, dass die Variabilität des Ranking mit zunehmender Dauer der Dauer der Virulenten Periode abnimmt.

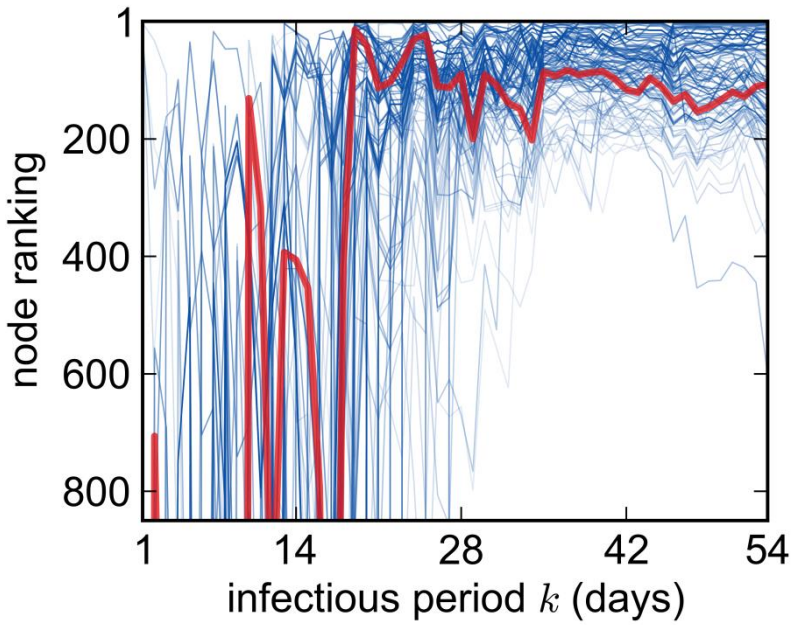


Abbildung 3 Rangierung von Knoten in Abhängigkeit von der Dauer der Virulente Periode

Die Ermittlung von Knoten, die für einen Angriff auf die Lebensmittelkette in Frage kommen, konnten nur durch die Nutzung sehr leistungsstarker Rechner ermittelt werden. Deshalb wurde abschließend der Frage nachgegangen, ob eine Auswahl der Knoten auch über einfach zu berechnende Zentralitätsmasse, die aus dem äquivalenten statischen Netz abgeleitet werden, erfolgen kann. Folgende Zentralitätsmaße der statischen Repräsentation des Netzwerkes wurden gewählt: k-core, degree und betweenness. Untersucht wird die Übereinstimmung im Top-p Ranking nach statischen Zentralitätsmaßen und der Virulenz. Dabei wird die Übereinstimmung durch Schnittmenge von je zwei Rangierungsmethoden bestimmt. Die Abhängigkeit von der Stichprobengröße und der Dauer der Virulenz wurde untersucht, die Ergebnisse sind in Abbildung 4 dargestellt.

Abbildung 4 verdeutlicht, dass die Übereinstimmung im Ranking nur bei sehr großen Stichprobenumfängen (> 50% der Gesamtgröße des Netzes) nennenswert ist. Das gilt sowohl für die Dauer der infektiösen Periode von 7 Tagen als auch für die Dauer von 42 Tagen. Deshalb kann davon ausgegangen werden, dass die aus der statischen Netzwerkrepräsentation abgeleiteten Zentralitätsmaße ungeeignet sind, geeignete Knoten für einen Angriff auf die Lebensmittelkette zu identifizieren.

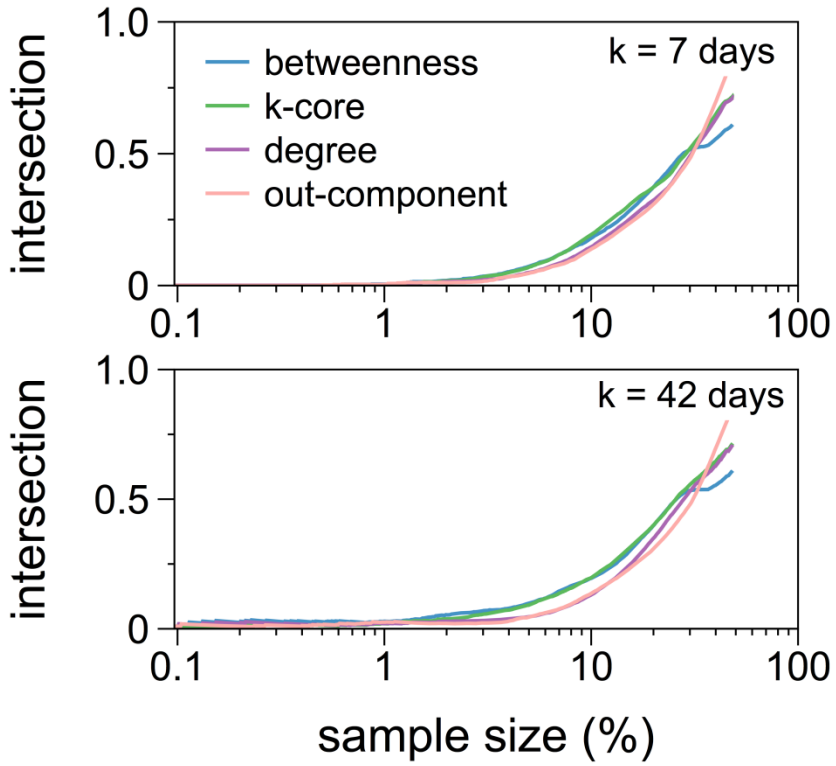


Abbildung 4: Vergleich zwischen der dynamischen Virulenz und statischen Zentralitätsmaßen.

Gegenüberstellung der gesteckten Zielen

Dieses AP3 Teilprojekt diente der Entwicklung von Methoden zur Identifikation von virulenten Knoten des betrachteten Netzwerkes, die für einen Angriff auf die Lebensmittelkette in Frage kommen. Dabei soll die Warenkette als Vehikel zur Verbreitung des Agens genutzt werden.

Die Methoden wurden entwickelt und die Identifikation der relevante Knoten ist möglich. Die Untersuchengen zeigen aber auch, dass

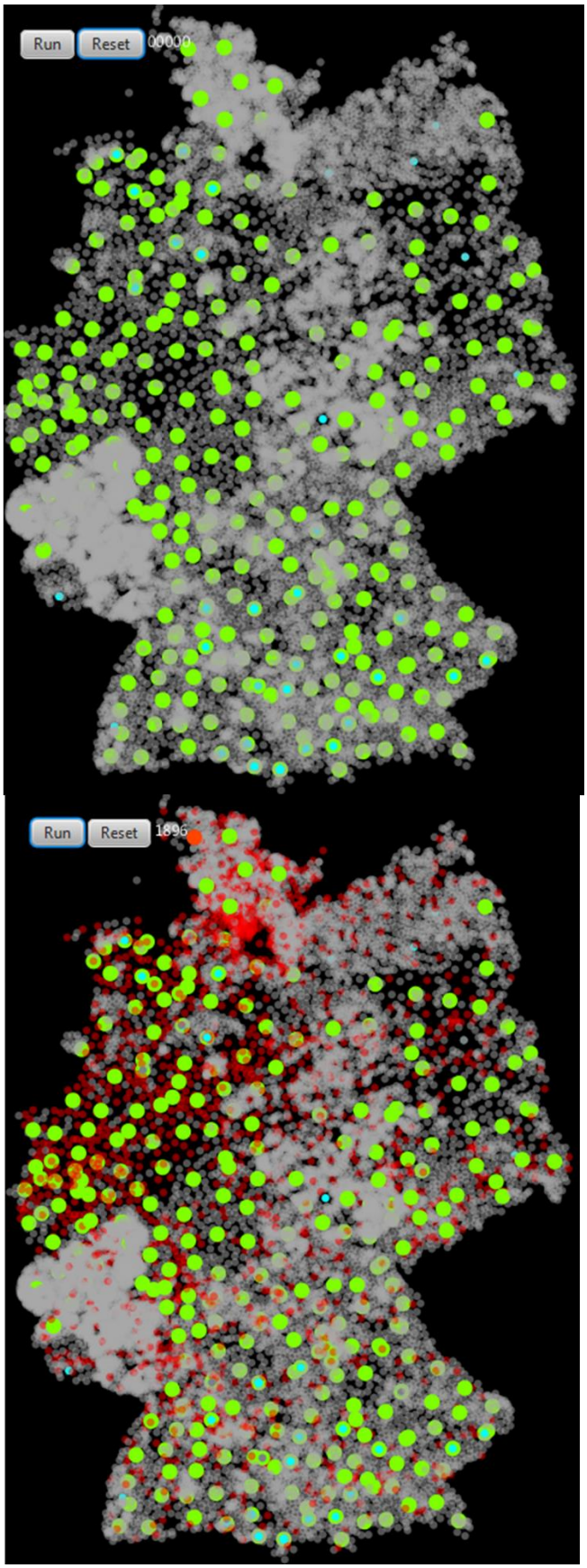
1. zur Identifikation der Knoten umfangreiche Berechnungen notwendig sind. Diese sind nur möglich, wenn detaillierte Informationen über die Handelsnetze vorliegen,
2. eine statische Betrachtung des zeitdynamischen Netzes nicht ausreichend ist, um relevante Knoten zu identifizieren,
3. die Warenkette durch zufällige Auswahl einiger weniger Knoten wahrscheinlich nicht kontaminiert werden kann,
4. die Sicherung der hier betrachteten Warenkette durch die Sicherung der HI-Tier Datenbank erfolgen kann.

Warenkette Milchproduktion

Die bei der Analyse der Warenkette Fleischproduktion entwickelten Modelle können auch für die Warenkette Milch angewendet werden.

Für die Milchwarenkette kann die räumliche Ausbreitung einer potenziellen Kontamination dargestellt werden. Hierfür wurde die geographische Lage der landwirtschaftlichen Erzeugerbetriebe näherungsweise ermittelt: Landwirtschaftliche Betriebe können Gemeinden zugeordnet werden und als geographische Lage wurde zufällig eine Position innerhalb der Gemeinde gewählt. Die Lieferstrukturen zwischen landwirtschaftlichen Milcherzeugern und milchverarbeitenden Betrieben wurde mittel des gravity-Algorithmus simuliert. Die Visualisierung einer potenziellen Ausbreitung bei der Kontaminierung eines Milcherzeugers bis zum Verbraucher auf Gemeindeebene ist in Abbildung 5 dargestellt. Eine zeitlich chronologische Auflösung der Handelsstrukturen in der Milchwirtschaft liegt nur bei den Unternehmen der milchverarbeitenden Industrie vor und ist nicht öffentlich zugänglich.

- 294 Milcherzeuger (Kreisebene)
- 80 Molkereien
- 12223 Gemeinden



ein Milcherzeuger wird infiziert
und
1896 Gemeinden werden von diesem Milcherzeuger beliefert

Abbildung 5: Räumliche Darstellung eines Ausbreitungsgeschehens in der Milchwirtschaft.

Optimierungsverfahren zur Unterstützung der Einsatzplanung von Interventionsmaßnahmen in Logistikketten

Die Optimierung von Interventionsmaßnahmen kann auf zwei Ebenen erfolgen 1) Optimierung im Rahmen der Gefahrenabwehr und 2) Optimierung der Maßnahmen nach Eintreten der Schadenslage.

Die Optimierung nach 1) und 2) wurde für die Milchwirtschaft unter Verwendung des greedy Algorithmus durchgeführt. Folgendes Kontaminations-Szenario wurde betrachtet:

Ein potenzieller Angriff auf die Warenkette Milch erfolgt mit dem Ziel einer maximalen Schadenslage zu erreichen. Die Schadenlage wird durch die Anzahl der mit der verunreinigten Milch belieferten Verbrauchergemeinden quantifiziert. Dieses Ziel soll mit einer minimalen Anzahl an Eintragsquellen erreicht werden. Die Angriffe auf die Warenkette Milch werden sequentiell ausgeführt. Dennoch soll mit dem ersten Eintrag eine maximale Anzahl der Verbrauchergemeinden erreicht werden, da unsicher ist, ob es zu weiteren Einträgen in die Warenkette kommen kann. Jede weitere ausgewählte Eintragsquelle soll die Schadenlage maximal vergrößern. Ziele für den Eintrag von Agentien sind die Milcherzeuger, die Primärproduktion. Die Funktionsweise des Greedy Algorithmus ist in Abbildung 6 dargestellt.

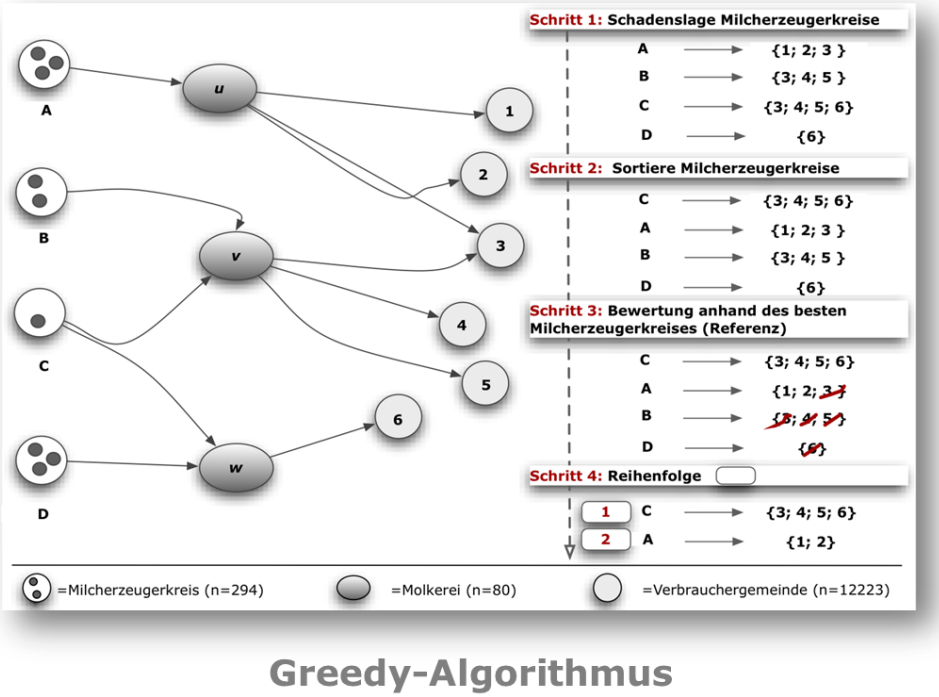


Abbildung 6: Funktionsweise des Greedy-Algorithmus

Schritt 1: Berechnung der erreichten Verbrauchergemeinden je Milcherzeugerkreis; **Schritt 2:** Absteigende Sortierung der Milcherzeugerkreise anhand der erreichten Verbrauchergemeinden; **Schritt 3:** Auswahl des ersten (besten) Milcherzeugerkreises und alle weiteren Milcherzeugerkreise werden anhand des ersten Milcherzeugerkreises hinsichtlich des Zuwachs an weiteren Verbrauchergemeinden bewertet; **Schritt 4:** Entsprechend des Zuwachses an weiteren Verbrauchergemeinden wird die Reigenfolge der Milcherzeugerkreise als potenzielle Eintragsquellen festgelegt. Der Greedy-Algorithmus wählt solange die geeignetsten Milcherzeugerkreise aus, bis alle Verbrauchergemeinden (n= 12223) erreicht worden sind.

Der Greedy-Algorithmus wurde auf 100 mögliche Handelsnetzwerke der Warenkette Milch angewendet. In jedem Handelsnetzwerk befinden sich 294 Milcherzeugerkreise, 80 Molkereien und 12223 Verbauchergemeinden. Die Optimierung wurde für 50 Handelsnetzwerke ohne den Molkereizwischenhandel und für 50 Handelsnetzwerke unter Berücksichtigung des Molkereizwischenhandels durchgeführt.

Mittels des Greedy-Algorithmus sollen folgende Forschungsfragen beantwortet werden:

a) Anzahl der auszuwählenden Eintragsquellen, um alle Verbrauchergemeinden in Deutschland zu erreichen?
b) Variabilität bezüglich der ausgewählten Eintragsquellen zwischen den Simulationsläufen.
c) Ermittlung der Reihenfolge der Kontamination, Variabilität zwischen den Simulationsläufen.

Die Ergebnisse der Optimierung werden nach den Forschungsfragen a-c dargestellt.

a) Wie viele Milcherzeugerkreise als potenzielle Eintragsquelle müsste der Angreifer auswählen, um alle Verbrauchergemeinden in Deutschland zu erreichen (Worst-Case-Situation)?

Die Anzahl der benötigten Milcherzeugerkreise, die als Eintragsquellen ausgewählt werden müssten, um das Ziel einer maximale Schadenslage mit minimalen Anzahl an Eintragsquellen zu realisieren, sind in Abbildung 7 und 8 dargestellt. Beide Abbildungen gliedern sich in je zwei Grafiken. Im oberen Teil der Abbildungen 7 und 8 (a) ist jeweils der Anteil der erreichten Verbrauchergemeinden dargestellt. Im unteren Teil sind die ausgewählten Milcherzeugerkreise angegeben. Abbildung 8 (und analog Abbildung 7) ist wie folgt zu lesen: Im unteren Teil ist in der ersten Spalte der für die jeweiligen Simulationsläufe (1-50 Zeilen) optimale Erzeugerkreis als Eintragsquelle angegeben (in Abbildung 8 ist es immer derselbe). Korrespondierend zum unteren Teil der Abbildung ist im oberen Teil die resultierende Schadenlage (als Prozentsatz erreichter Verbrauchergemeinden) für alle 50 Simulationsläufe ausgewiesen. In Abbildung 8 beträgt die Schadenslage bei einem ausgewählten Erzeugerkreis ca. 70%.

Unter Berücksichtigung des Molkereizwischenhandels (Abb. 7) wurden minimal 7 (siehe Simulationslauf 3) und maximal 13 (Simulationslauf 44) Milcherzeugerkreise als

Eintragsquellen benötigt, um alle Verbrauchergemeinden zu erreichen. Insgesamt wurden von den 294 potenziellen Milcherzeugerkreisen, in 50 Simulationsläufen 86 verschiedene Milcherzeugerkreise ausgewählt. Ohne Molkereizwischenhandel wurden minimal 15 und maximal 20 Milcherzeugerkreise benötigt, um alle Verbrauchergemeinden zu erreichen. Insgesamt wurden von den 294 potenziellen Milcherzeugerkreisen in allen 50 Simulationsläufen (ohne Molkereizwischenhandel) 76 verschiedene Milcherzeugerkreise ausgewählt worden.

b) Um welche Milcherzeugerkreise würde es hierbei handeln?

Jede Farbe in der Abbildung 7 und 8 ist immer einem spezifischen Milcherzeugerkreis zugeordnet. In der Abbildung 8 wird erkennbar, dass als erste bzw. beste Eintragsquelle in allen 50 Simulationsläufen immer der Milcherzeuger ID100 (rot) als Ersteintragsziel ausgewählt wurde. An zweiter Stelle wurden in allen 50 Simulationsläufen insgesamt 6 verscheiden Milcherzeugerkreise als geeignete Eintragsquelle ausgewählt.

c) In welcher Reihenfolge sollten die Milcherzeugerkreise als Eintragsquellen ausgewählt werden?

Jede Zeile pro Handelsnetzwerk stellt die Reihenfolge der Milcherzeugerkreise als potenzielle Eintragsquelle da (Abb. 7b und 8b). In Abbildung 8 wird erkennbar, dass auf den ersten 5 Positionen wenige Milcherzeugerkreise als die besten Eintragsquellen in Frage kommen. Auf den hinteren Positionen (7 bis 20) findet sich eine größere Heterogenität an Eintragsquellen.

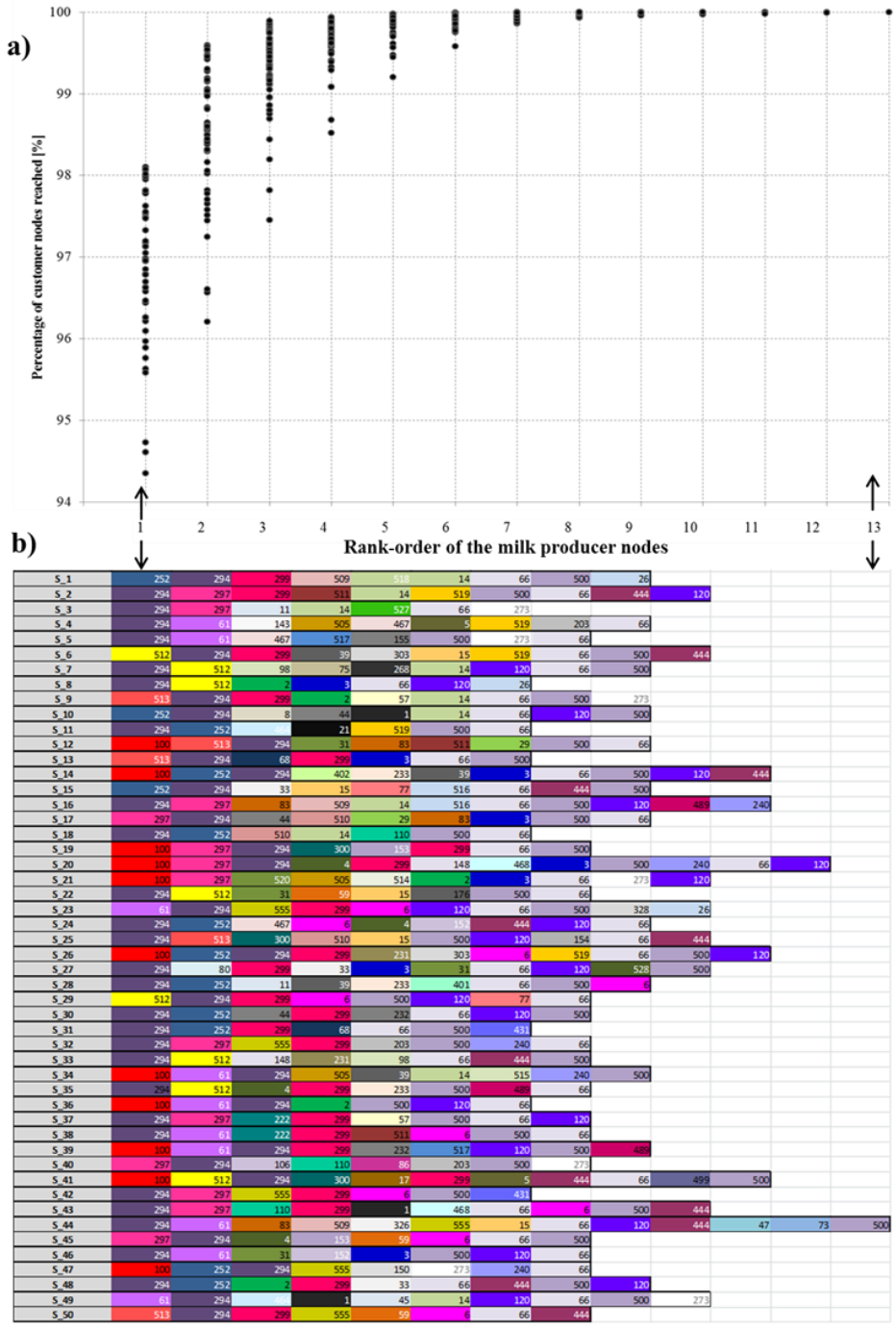


Abbildung 7: Kontrollplan von anonymisierten Milcherzeugerkreisen und deren hervorgerufene Schadenslage (unter Berücksichtigung von Molkereizwischenhandelsstrukturen: a) Schadenslage je Milcherzeugerkreis je berechneter Position. Jeder Punkt in Abbildung a stellt die potenzielle Schadenslage eines Milcherzeugerkreis in der Spalte der Abbildung b da; b) 50 verschiedene Handelsnetzwerke (S 1 bis S 50). Jede Zeile präsentiert ein Handelsnetzwerk; jede Zelle bzw. jede Farbe stellt einen Milcherzeugerkreis dar. Eine Zeilenlänge spiegelt die benötigte Anzahl an Milcherzeugerkreise da, um alle Verbrauchergemeinden zu erreichen.

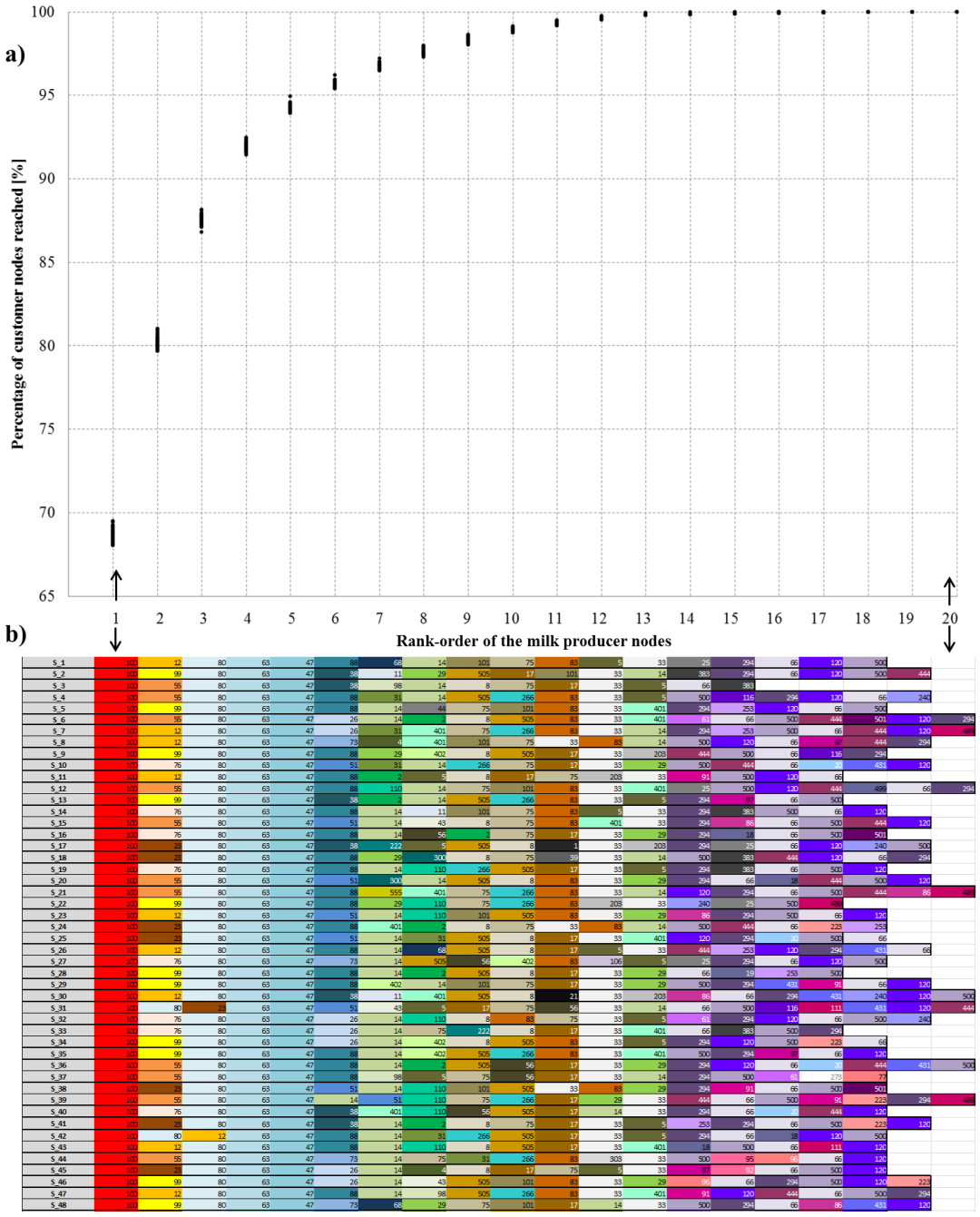


Abbildung 8: Kontrollplan von anonymisierten Milcherzeugerkreisen und deren hervorgerufene Schadenslage (ohne Berücksichtigung der Molkereizwischenhandelsstrukturen: a) Schadenslage je Milcherzeugerkreis je berechneter Position. Jeder Punkt in Abbildung a stellt die potenzielle Schadenslage eines Milcherzeugerkreis in der Spalte der Abbildung b da; b) 50 verschiedene Handelsnetzwerke (S 1 bis S 50). Jede Zeile präsentiert ein Handelsnetzwerk; jede Zelle bzw. jede Farbe stellt einen Milcherzeugerkreis dar. Eine Zeilenlänge spiegelt die benötigte Anzahl an Milcherzeugerkreise da, um alle Verbrauchergemeinden zu erreichen.

Gegenüberstellung der gesteckten Zielen

Dieses AP3 Teilprojekt diente der Entwicklung von Methoden zur Identifikation von virulenten Knoten der betrachteten Warenkette Milch, die für einen Angriff auf die Lebensmittelkette in Frage kommen. Dabei soll die Warenkette als Vehikel zur Verbreitung des Agens genutzt werden.

1) *Geeignete Eintragsquellen für bewusste Eintragungen in der Milchversorgungskette*

Für das ausgewählte Szenario kommen von den 294 potentiellen Milcherzeugerkreisen 86 (29%) (mit Molkereizwischenhandel) bzw. 76 (26%) Milcherzeugerkreise (ohne Molkereizwischenhandel) als potenzielle Eintragsquellen in Frage.

2) *Aufwand von Überwachungstätigkeit*

47 Milcherzeugerkreise kommen in beiden Szenarien (mit/ohne Molkereizwischenhandel) vor. Die Überwachungstätigkeit müsste sich insgesamt auf (115) 39% Milcherzeugerkreise fokussieren.

2. Veröffentlichungen

Ausgewählte Forschungsergebnisse wurden in peer reviewed Fachzeitschriften veröffentlicht. Die Forschungsarbeit mündete in zwei Dissertationen, die beide mit magna cum laude bewertet wurden. Beide Dissertationen wurden mit Forschungspreisen ausgezeichnet:

Forschungspreise:

Beate Pinior: Agrarinformatikpreis 2014 der Gesellschaft für Informatik in der Agrar- und Ernährungswissenschaft (Deutschland)

Hartmut Lentz: Förderpreis der Friedrich-Loeffler Instituts 2014 für besonders erfolgreich abgeschlossene Dissertationen.

Dissertationen:

H. Lentz: Paths for epidemics in static and temporal networks. Humboldt-Universität zu Berlin, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät I, 2013.
http://edoc.hu-berlin.de/dissertationen/lentz-hartmut-2013-11-06/PDF/lentz.pdf

Beate Pinior: Application of Models for Safeguarding the Milk Supply Chain. Landwirtschaftliche Fakultät der Universität Bonn, 2013.
http://hss.ulb.uni-bonn.de/2013/3258/3258.pdf

Weitere Veröffentlichungen (peer reviewed):

Konschake, M., Lentz, H. H. K., Conraths, F. J., Hövel, P., and Selhorst, T. (2013). On the Robustness of In- and Out-Components in a Temporal Network. *PLOS ONE*, 8(2):e55223.

Lentz, H. H. K., Konschake, M., Teske, K., Kasper, M., Rother, B., Carmanns, R., Petersen, B., Conraths, F. J., and Selhorst, T. (2011). Trade communities and their spatial patterns in the German pork production network. *Prev. Vet. Med.*, 98(2-3):176–181.

Lentz, H. H. K., Selhorst, T., and Sokolov, I. M. (2012). Spread of infectious diseases in directed and modular metapopulation networks. *Phys. Rev. E*, 85:066111.

Lentz, H. H. K., Selhorst, T., and Sokolov, I. M. (2013). Unfolding Accessibility Provides a Macroscopic Approach to Temporal Networks. *Phys. Rev. Lett.*, 110(11):118701.

Pinior, B.; Platz, U.; Ahrens, U.; Petersen, B.; Conraths, F.; Selhorst, T (2012a): The German Milky Way: trade structure of the milk industry and possible consequences of a food crisis. Journal on Chain and Network Science, Vol.12 (1), pp. 25-39.

Pinior, B.; Konschake, M.; Platz, U.; Thiele, H.; Petersen, B.; Conraths, F.C.; Selhorst, T (2012b): The Trade network in the dairy industry and its implication for the spread of a contagion. In: Journal of Dairy Science, Vol. 95 (11), pp. 6351-6361.

Beiträge auf nationalen und internationalen Fachtagugen (peer reviewed)

Belaya, V.; Hansen, H.; Pinior, B (2013): Measuring the costs of foodborne diseases: A review and Classification of the Literature. In: Schriften der Gesellschaft für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften des Landbaues e.V., Bd. 48, pp. 47-58.

Wilke, T.; Belaya, V.; Pinior, B (2012): How to measure food safety? A review of relevant literature. In: Rickert, U., Schiefer, G (eds.): System Dynamics and Innovation in the Food Network. Proceedings of the 6th International European Forum, pp. 61-83.

Pinior, B.; Belaya, V.; Petersen, B.; Selhorst, T (2011): Structures and relationships in supply chains and networks: conceptual issues and application in German dairy sector. Conference proceedings (CD) at the International Conference on Economics and Management of Networks, pp. 1-21.

Beiträge auf nationalen und internationalen Fachtagungen

Pinior, B.; Konschake, M.; Kolski, P.; Lentz, H.; Slütter, S.; Selhorst, T (2012): Optimierungsalgorithmen in der Milchwirtschaft und ein Paradoxon in der Gefahren-Schadenslagen-Berechnung. Proceedings and Presentation at the Internationale DACH-Epidemiologie Tagung, Deutsche Veterinärmedizinische Gesellschaft, pp. 45-47, ISBN: 978-3-86345-098-4; 5-7 September, Neuruppin, Germany.

Belaya, V.; Hansen, H.; Pinior, B (2012): Measuring the costs of foodborne diseases: A review and Classification of the Literature. Presentation at GEWISOLA Herausforderungen des globalen Wandels für Agrarentwicklung und Welternährung, 26-28. September, Hohenheim, Germany.

Lentz, H.; Konschake, M.; Kolski, P.; Pinior, B.; Selhorst, T (2012): Epidemische Leitfähigkeit zeitabhängiger Netzwerke. Proceedings and Presentation at the Internationale DACH Epidemiologie Tagung, Deutsche Veterinärmedizinische Gesellschaft, pp. 43, ISBN: 978-3-86345-098-4; 5-7 September, Neuruppin, Germany.

Kolski, P.; Pinior, B.; Selhorst, T (2012): Visualisierung und Analyse von Epidemien in Echtzeit. Proceedings and Presentation at the Internationale DACH Epidemiologie Tagung, Deutsche Veterinärmedizinische Gesellschaft, pp. 38, ISBN: 978-3-86345-098-4; 5-7 September, Neuruppin, Germany.

Pinior, B (2012):

The spread of contaminated milk: Identification of high-risk companies and the vulnerability of communities. Presentation at the Food Safety Management Conference, 19-20 June 2012, Campden BRI, United Kingdom (UK).

Pinior, B.; Slütter, S.; Wilke, T.; Selhorst, T.; Petersen, B (2012):

Prozess-Referenzmodell (PRM) nach der ISO/IEC 15504 für das Aufschaltungs- und Austauschmodell (AAM) von krisenrelevanten Informationen. Proceedings and Poster

presented at the International DACH Epidemiologie Tagung, Deutsche Veterinärmedizinische Gesellschaft, pp. 108-109, ISBN: 978-3-86345-098-4; 5-7 September, Neuruppin, Germany.

Slütter, S.; Schulze-Geisthövel, S.; Pinior, B.; Wilke, T.; Van der Wolf, P.; Petersen, B (2012): Support in Crisis Communication by forming a strategic alliance in information management on the example of the German pork production chain. Proceedings and Poster presented at the Internationale DACH Epidemiologie Tagung, Deutsche Veterinärmedizinische Gesellschaft, pp. 114-115, ISBN: 978-3-86345-098-4; 5-7 September, Neuruppin, Germany.

Pinior, B.; Selhorst, T (2012): Trade structures as spread catalyst of agents? Investigation of trade patterns in the German dairy industry. Poster presented at the International Food Safety Conference, 21-23 February, Dubai, United Arab Emirates.

Slütter, S.; Schulze-Geisthövel, S.; Pinior, B.; Wilke, T.; Van der Wolf, P.; Petersen, B (2012): Maßnahmen zur Früherkennung und Bekämpfung der Schweinepest in Deutschland und den Niederlanden im Vergleich. Proceedings and Poster presented at the International DACH Epidemiologie Tagung, Deutsche Veterinärmedizinische Gesellschaft, pp. 116-117, ISBN: 978-3-86345-098-4; 5-7 September, Neuruppin, Germany.

Pinior, B (2012): Investigation of failures in interdependent food systems: effects of structural change in the meat and dairy industry to the fragmentation of a production flow. Poster presented at the International Food Safety Conference, 21- 23 February, Dubai, United Arab Emirates.

Pinior, B (2012): How can high-risk companies be identified and which role takes the trade of food in the spread of food contamination. Proceedings and Poster presented at the 13. Fachsymposium Lebensmittelmikrobiologie 28. - 30. March, pp. 50, Stuttgart, Germany.

Belaya, V.; Pinior, B (2012): Economic assessment of food safety improvement in supply chains: clarification of conceptual issues. Proceedings and Presentation at the 10th Wageningen International Conference on Chain and Network Management (WICaNeM 2012), 23-25 May, Wageningen, The Netherlands.

Pinior, B.; Platz, U.; Ahrens, U.; Petersen, B.; Conraths, F.; Selhorst, T (2012): The German Milky Way: Trade structure of the milk industry and possible consequences of a food crisis. Proceedings and Presentation at the 10th Wageningen International Conference on Chain and Network Management (WICaNeM 2012), 23-25 May, Wageningen, The Netherlands.

Pinior, B (2012): Computer simulations of the spread of contamination on trade networks in the dairy industry. Proceedings and Presentation at the 13. Fachsymposium Lebensmittelmikrobiologie 28. - 30. März, pp. 27, Stuttgart, Germany.

Pinior, B (2012): Vernetzte Lebensmittelproduktion: Von Daten zur Risikoabschätzung. Im Rahmen der Graduate School. Meat Challenge, 27. January, Bonn, Germany.

Slütter, S.; Wilke, T.; Pinior, B.; Breuer, O.; Petersen, B (2012): Support in crisis communication by forming a strategic alliance in information management on the example of

the German pork production chain. Presentation at the Food Safety Management Conference. 19-20 June, Campden BRI, United Kingdom (UK).

Selhorst, T.; Pinior, B.; Konschake, M.; Lentz, H.; Kolski, P (2012): Can livestock trade network properties facilitate the development of efficient strategies for animal disease prevention? EE² - Epiwork/Epifor 2nd International Workshop - Facing the Challenge of Infectious Diseases, Pré-Saint-Didier, 18-20 January, Aosta, Italy.

Wilke, T.; Belaya, V.; Pinior, B (2012): How to measure food safety? A review of relevant literature. Presentation at the International 6th European Forum on Innovation and System Dynamics in Food Networks. 13-17 February, Innsbruck, Austria.

Pinior, B.; Belaya, V.; Hansen, H.; Selhorst, T (2011): The relevance of supply chain structures and relationships for studying the impact of food scandals in German dairy sector. Proceedings and Presentation at the Milk Society of Milk Science Conference, 12-13 September, Bern, Switzerland.

Pinior, B.; Kasper, M.; Konschake, M.; Kolski, P.; Lentz, H.; Selhorst, T (2011): Realitätskonforme Netzlogistikstrukturen als Ausbreitungskatalysator von Agenzien. Proceedings and Presentation at the Internationale DACH Epidemiologie Tagung, p. 39, ISBN: 9783950204254; 31-02 August-September, Wien, Austria.

Pinior, B.; Belaya, V.; Petersen, B.; Selhorst, T (2011): Structures and relationships in supply chains and networks: conceptual issues and application in German dairy sector. Proceedings (CD) and Presentation at the International Conference on Economics and Management of Networks, 1-3 December, pp. 1-21, Limassol, Cyprus.

Kolski, P.; Lentz, H.; Pinior, B.; Konschake, M.; Selhorst, T (2011): Modellierung, Visualisierung von Epidemien. Presentation at the 3. Treffen der Moderatoren der Regionalen Netzwerke. Gemeinsam gegen MRSA/MRE, 15-16 December, Wernigerode, Germany.

Kasper, M.; Konschake, M.; Pinior, B.; Kolski, P.; Lentz, H.; Selhorst, T (2011): Handel, ja oder nein? Entwicklung von Entscheidungshilfen im Krisenmanagement. Proceedings and Presentation at the Internationale DACH Epidemiologie Tagung, p. 37- 38, ISBN: 9783950204254; 31-02 August-September, Wien, Austria.

Lentz, H.; Kasper, M.; Konschake, M.; Kolski, P.; Pinior, B.; Selhorst, T (2011): Über die Bedeutung der Zeitkomponente in Handelsnetzwerken. Proceedings and Presentation at the Internationale DACH Epidemiologie Tagung, p. 40, ISBN: 9783950204254; 31-02 August-September, Wien, Austria.

Kolski, P.; Lentz, H.; Konschake, M.; Pinior, B.; Kasper, M.; Selhorst, T (2011): Visualisierung in Echtzeit – Epidemien intuitiv erleben. Proceedings and Presentation at the Internationale DACH Epidemiologie Tagung, p. 28, ISBN: 9783950204254; 31-02 August-September, Wien, Austria.

Slütter, S.; Ibald, R.; Pinior, B.; Brinkmann, D.; Petersen, B. (2011): Determine the room for improvement of processes within the management of crisis and their prevention - the maturity

model. In: Stegemann, A., Heres, L., Swanenburg, L. & Peter van deer Wolf .(eds.): Proceedings Book - 9th International Conference on the Epidemiology and Control of biological, chemical and physical hazards in pigs and pork, p. 395, 19.-22. June, Maastricht, The Netherlands.

Kasper, M.; Konschake, M.; Pinior, B.; Kolski, P.; Lentz, H.; Wilke, T.; Brinkmann, D.; Petersen, B.; Selhorst, T. (2011): In: Stegemann, A., Heres, L., Swanenburg, L. & Peter van deer Wolf .(eds.): Proceedings Book - 9th International Conference on the Epidemiology and Control of biological, chemical and physical hazards in pigs and pork, p. 75-78, 19.-22. June, Maastricht, The Netherlands.