

InGrid

Innovative Grid-Entwicklungen für ingenieurwissenschaftliche Anwendungen

6. Bericht AP 2.5: Evaluation der Anwendung anhand einer exemplarischen Anwendung

Projektpartner:

WASY Gesellschaft für wasserwirtschaftliche Planung und Systemforschung mbH

Waltersdorfer Straße 105

12526 Berlin

Bearbeiter:

Dipl.-Hyd. Udo Junghans

Dipl.-Ing. Olaf Arndt



Inhaltsverzeichnis

1	Gegenstand und Grundlage	3
2	Methodik und Vorgehensweise	3
3	Test und Evaluierung unter Verwendung des Szenario 1	3
3.1	Wasserwirtschaftlicher Hintergrund	3
3.2	Definition des Optimierungsproblems unter Einsatz der Nutzerschnittstellenwerkzeuge	4
3.3	Verhalten der Optimierungsalgorithmen bei der Standortoptimierung	6
3.3.1	Ergebnis und Aufwand der Optimierung	6
3.3.2	Vorgehen bei der Standortsuche	6
3.4	Ergebnisse der Optimierung Szenario 1	8
4	Test und Evaluierung unter Verwendung des Szenario 2	10
4.1	Wasserwirtschaftlicher Hintergrund und Werkzeuge	10
4.2	Auswahl des Testgebietes und Definition des Szenario 2	11
4.3	Verlauf und Ergebnis der Optimierung	12

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Verteilung der Stoffkonzentration für Szenario 1 ohne weitere Maßnahmen. Die Lage der Trinkwasserbrunnen ist mit roten Rechtecken markiert.....	4
Abbildung 2:	Nutzerschnittstelle zur Definition von FEFLOW-Optimierungsaufgaben, hier Definition des Jobs für die Optimierung der Abfangung unter der Verwendung von maximal 5 Brunnen.	5
Abbildung 3:	Bewegung der vom Algorithmus APPS geprüften Standorte über den Optimierungsprozess. Die Farbe der Punkte repräsentiert die Nummer des Modellaufrufs. Der blaue Umring grenzt die Zone ab, in der eine Maximalkonzentration von 50 mg/l auftreten darf. Der grüne Umring stellt die Zone der potentiellen Anlagenstandorte dar.....	7
Abbildung 4:	Bewegung der vom Algorithmus PSS geprüften Standorte über den Optimierungsprozess. Die Farbe der Punkte repräsentiert die Nummer des Modellaufrufs. Der blaue Umring grenzt die Zone ab, in der eine Maximalkonzentration von 50 mg/l auftreten darf. Der grüne Umring stellt die Zone der potentiellen Anlagenstandorte dar.....	7
Abbildung 5:	Lage der besten Ergebnisse der Standortoptimierung mit PSS für die Varianten mit einem, zwei und fünf Abfangbrunnen des Szenarios 1 mit angenommenen Pumpmengen [m ³ /d].	9
Abbildung 5:	Das als Werkzeug genutzte Grundwasserströmungsmodell für den linken Niederrhein unter FEFLOW.....	10
Abbildung 7:	Lage des Testgebietes (violett) zu Genossenschaftsgebiet (schwarz) und Modellgebiet (rot).	11
Abbildung 8:	Lage und Pumpmengen [m ³ /d] der bisher besten gültigen Lösung für die Optimierung im Bereich Saalhoff.	13

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Vergleich des Verhaltens der Algorithmen bei der Nutzung für die Standortoptimierung einer 2-Brunnen-Abfanganlage des Szenario 1.	6
Tabelle 2:	Die jeweils besten Ergebnisse der drei Varianten der Standortoptimierung des Szenario 1. 8	



1 Gegenstand und Grundlage

Der vorliegende Bericht dokumentiert Test- und Evaluationsergebnisse der Werkzeuge, die die DHI-WASY GmbH im Rahmen der D-GRID Initiative InGrid erarbeitet hat. Im Fokus der Tests standen dabei die Werkzeuge zur Standortoptimierung, die von einem Orchester verschiedenster Services gebildet werden. Neben den Ergebnissen auf dem neuen Arbeitsfeld der Standortoptimierung mittels Algorithmen der direkten Suche wurden die Erfahrungen der verteilten Jobbearbeitung auf den verschiedenen D-GRID-Ressourcen ausgewertet.

2 Methodik und Vorgehensweise

Für die Testung der entwickelten Werkzeuge wurden zwei Szenarien herangezogen. Ein Szenario entstammt den Erfahrungen der DHI-WASY GmbH. Es beschäftigt sich mit der Sicherung von Trinkwasserbrunnen vor einem Schadstoffzustrom durch den Einsatz von Abfanganlagen. Es findet also eine qualitative Betrachtung des Grundwassers unter Einsatz eines FEFLOW-Stofftransportmodells statt. Die Abfanganlagen haben die Aufgabe, die Stoffkonzentration im Fassungsbereich der Trinkwasserbrunnen unter einem definierten Schwellenwert zu halten. Die Leistung der Abfanganlagen ist dabei zu minimieren, während der Standort in einem gewissen Bereich frei gewählt werden kann. Das für die Optimierung verwendete Modell weist Rechenzeiten im Bereich von mehreren Minuten auf.

Das zweite Szenario greift eine aktuelle und künftige Fragestellung der Linksniederrheinischen Entwässerungsgenossenschaft LINEG auf, für die die DHI-WASY GmbH ein mehr als 1000 km² großes Strömungsmodell aufgebaut hat, das hier zum Einsatz kommt. Die bergbaubedingten Bodensenkungen werden aufgrund der Grubenschließungen in absehbarer Zeit ausbleiben, so dass eine finale Standortplanung für die Sümpfanlagen stattfinden kann. Unter Berücksichtigung einzuhaltender Grundwasserstände ist die Leistung der Pumpanlagen zu minimieren. Zurzeit betreibt die LINEG mehrere Hundert Pumpen auf einem Gebiet von mehreren Hundert Quadratkilometern. Das für die Optimierung verwendete Modell weist Rechenzeiten im Bereich von mehreren Dekaminuten auf und ist damit deutlich rechenintensiver als das für Szenario 1 verwendete.

Für die Testung und Evaluation standen zum einen Ressourcen der DHI-WASY GmbH zur Verfügung, zum anderen D-GRID-Ressourcen:

SIGRID, Uni-Siegen

Gloria, SCAI

GT4BW. HLRS

Medigrid, Göttingen

Die D-GRID-Ressourcen wurden für die Bearbeitung des Szenarios 2 genutzt, während, das weniger rechenintensive Szenario 1 auf hauseigenen Ressourcen evaluiert wurde.

3 Test und Evaluierung unter Verwendung des Szenario 1

3.1 Wasserwirtschaftlicher Hintergrund

Das Szenario beschreibt eine gedachte Situation, in der zwei Trinkwasserbrunnen sowohl Uferfiltrat aus dem südlichen gelegenen See als auch Wasser aus dem nördlichen Zustrom fördern. Im nördlichen Teil des Betrachtungsgebietes befinden sich zwei Punktquellen über die eine Substanz in den Grundwasserleiter gelangt, die nur

in einer definierten Maximalkonzentration in die Brunnen gelangen dürfen. Ohne weitere Maßnahmen liegt die Konzentration an den Brunnen jedoch deutlich über dem Schwellenwert.

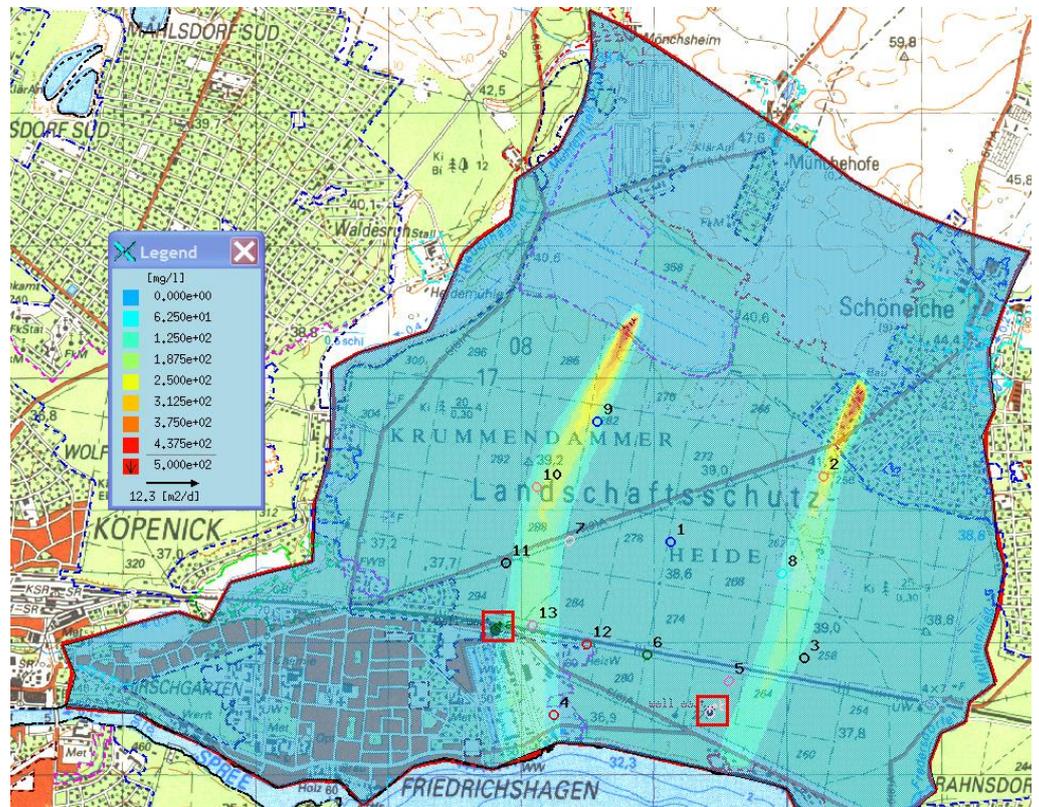


Abbildung 1: Verteilung der Stoffkonzentration für Szenario 1 ohne weitere Maßnahmen. Die Lage der Trinkwasserbrunnen ist mit roten Rechtecken markiert.

Mit der Hilfe von Abfanganlagen kann vermieden werden, dass die eingetragene Substanz in einer Konzentration in die Trinkwasserbrunnen gelangt, die höher als der Schwellenwert ist.

3.2 Definition des Optimierungsproblems unter Einsatz der Nutzerschnittstellenwerkzeuge

Zur Definition des Optimierungsjobs wurde die Nutzeroberfläche des FEFLOW-IFM-Moduls „Grid Access“ genutzt (siehe Abbildung 2). Der Reiter Optimization Job bietet die Möglichkeit, alle implementierten Arten der grundwasserbezogenen Optimierung bei der Jobdefinition anzusprechen, hier „Flow BC4 by coordinates“. Im Bereich Optimization Parameters werden weiterhin die zu variierenden Randbedingungen definiert, in diesem Falle die Koordinaten der Brunnen und ihre Pumpmenge. Es ergeben sich für diesen Fall also 15 Freiheitsgrade. Desweiteren wird der Bereich definiert, in dem die Brunnen positioniert werden können. Dieser Bereich wird entweder über einen Koordinatenbereich definiert oder kann zur Nutzung nicht rechteckiger Geometrien über eine FEFLOW Reference Distribution definiert werden. Im abgebildeten Fall, ist dies Verteilung mit der Bezeichnung „go_area“.

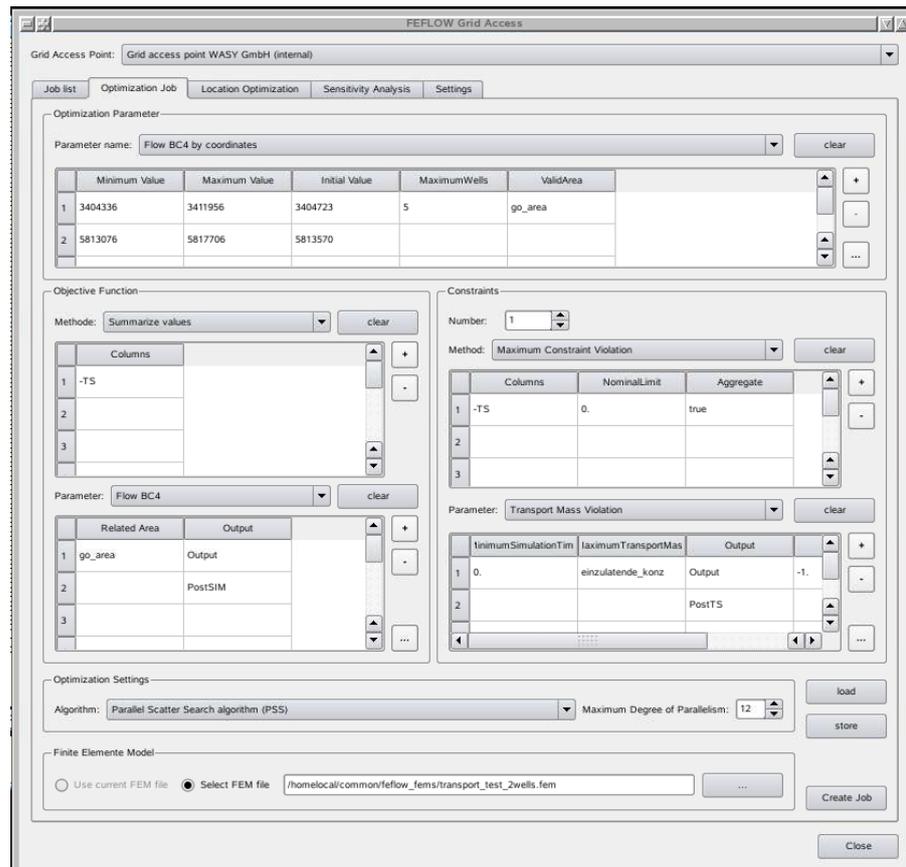


Abbildung 2: Nutzerschnittstelle zur Definition von FEFLOW-Optimierungsaufgaben, hier Definition des Jobs für die Optimierung der Abfangung unter der Verwendung von maximal 5 Brunnen.

Der Bereich Objective Function wird genutzt, um die Zielfunktion zu definieren. Im vorliegenden Beispiel werden alle Brunnenentnahmen (Parameter Flow BC4) aufsummiert (Methode Summarize Values), die im Bereich der "go area" liegen.

Zur Beschreibung der einzuhaltenden Bedingungen werden im Bereich Constraints Nebenbedingungen definiert. Im vorliegenden Fall wurde die zur Unterschreitung eines Grenzwertes die Methode Maximum Constraint Violation gewählt, die die Einhaltung der Stoffkonzentration (Parameter Transport Mass Violation) nach jedem Zeitschritt (PostTS) prüft. Die einzuhaltende Stoffkonzentrationsverteilung kann heterogen sein und wird der FEFLOW-Referenzverteilung "einzuhaltende_konz" entnommen.

Letztendlich erfolgt die Auswahl des Optimierungsalgorithmus, der maximalen Parallelität und des zu nutzenden FEFLOW-Fem-Files. Der eigentliche Job wird über den oben gewählten GRID Access Point abgesetzt und auf die unter dem Reiter Settings eingestellten Ressourcen verteilt.

Einzelheiten und weitere Informationen zur Anwendung des FEFLOW-Grid-Access-Moduls kann der Softwarebeschreibung entnommen werden.



3.3 Verhalten der Optimierungsalgorithmen bei der Standortoptimierung

3.3.1 Ergebnis und Aufwand der Optimierung

Da bisher keine Erfahrung bei der Nutzung der Algorithmen der OPTIX-Suite auf dem Gebiet der Standortoptimierung bestand, waren die Verhaltensmuster der drei Algorithmen APPS, DPS und PSS für diese Anwendung zu untersuchen. Für diese Untersuchung wurde das Szenario 1 herangezogen. Es wurde eine maximale Brunnenanzahl für die Abfanganlage von zwei festgesetzt. Die Optimierung erfolgte dreifach unter der Nutzung der drei genannten Algorithmen.

Tabelle 1: Vergleich des Verhaltens der Algorithmen bei der Nutzung für die Standortoptimierung einer 2-Brunnen-Abfanganlage des Szenario 1.

Algorithmus	Verhaltensmerkmale	
	Bestes Ergebnis	Anzahl der benötigten Modellaufrufe
APPS	11484 m ³ /d	168
DPS	13888 m ³ /d	1254
PSS	5474 m ³ /d	2958

Tabelle 1 zeigt, dass der APPS deutlich weniger Modellaufrufe bis zum Abschluss der Optimierung benötigt. Das Ergebnis der Optimierung liegt um ca. 20 unter dem des Algorithmus DPS, der jedoch eine Größenordnung mehr Modellaufrufe verwendet. Damit scheint der DPS im Vergleich für den Einsatz in der Standortoptimierung nicht geeignet zu sein. Der PSS benötigt mit fast 3 Tsd. Modellaufrufen mehr als doppelt so viele wie der DPS und fast 20 mal mehr als der APPS. Die gefundene Lösung erfordert jedoch auch nur eine um die Hälfte reduzierte Menge. Damit wird deutlich, dass der PSS mit seiner Eigenschaft auch aus lokalen Minima herauszufinden, von den drei getesteten für die Art der Anwendung der beste ist.

3.3.2 Vorgehen bei der Standortsuche

Das Vorgehen der Algorithmen bei der Standortsuche unterscheidet sich untereinander deutlich. Durch eine Auswertung der im Rahmen der Optimierung geprüften Standorte kann die Bewegung im Raum nachvollzogen werden. Dazu wurde Szenario 1 unter Berücksichtigung eines Trinkwasserbrunnens und eines zu positionierenden Abfangbrunnens betrachtet.

Abbildung 3 zeigt das Vorgehen des APPS. Bei der Interpretation der Abbildung ist zu berücksichtigen, dass generierte Positionen, wenn sie außerhalb der Zone der potentiellen Standorte oder des Modellgebietes liegen, auf den nächsten gültigen Knoten projiziert werden. Zu Beginn werden die maximalen Koordinatenvarianten ausgetestet. Konzentrisch zulaufend werden die Positionen getestet.

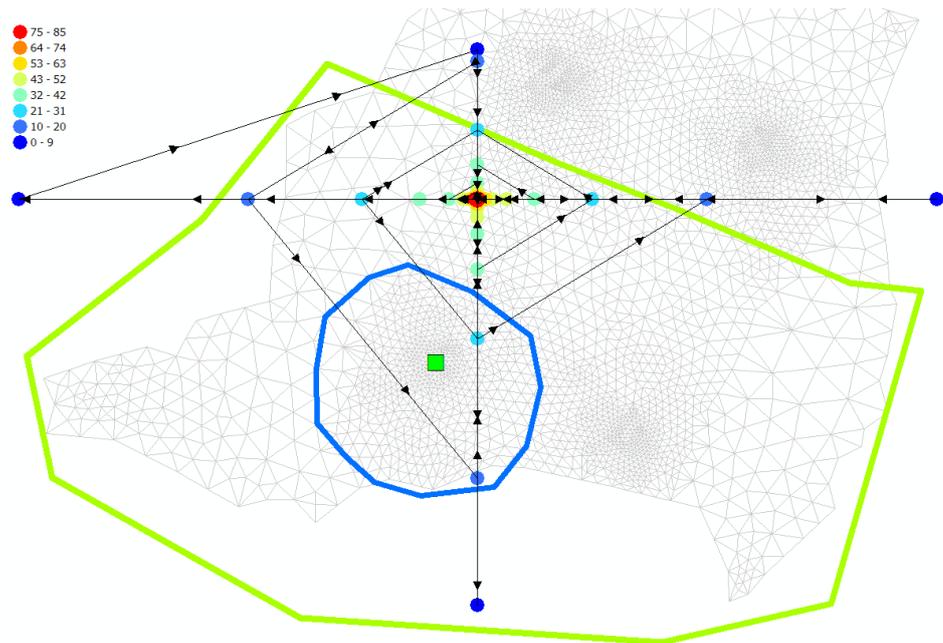


Abbildung 3: Bewegung der vom Algorithmus APPS geprüften Standorte über den Optimierungsprozess. Die Farbe der Punkte repräsentiert die Nummer des Modellaufrufs. Der blaue Umring grenzt die Zone ab, in der eine Maximalkonzentration von 50 mg/l auftreten darf. Der grüne Umring stellt die Zone der potentiellen Anlagenstandorte dar.

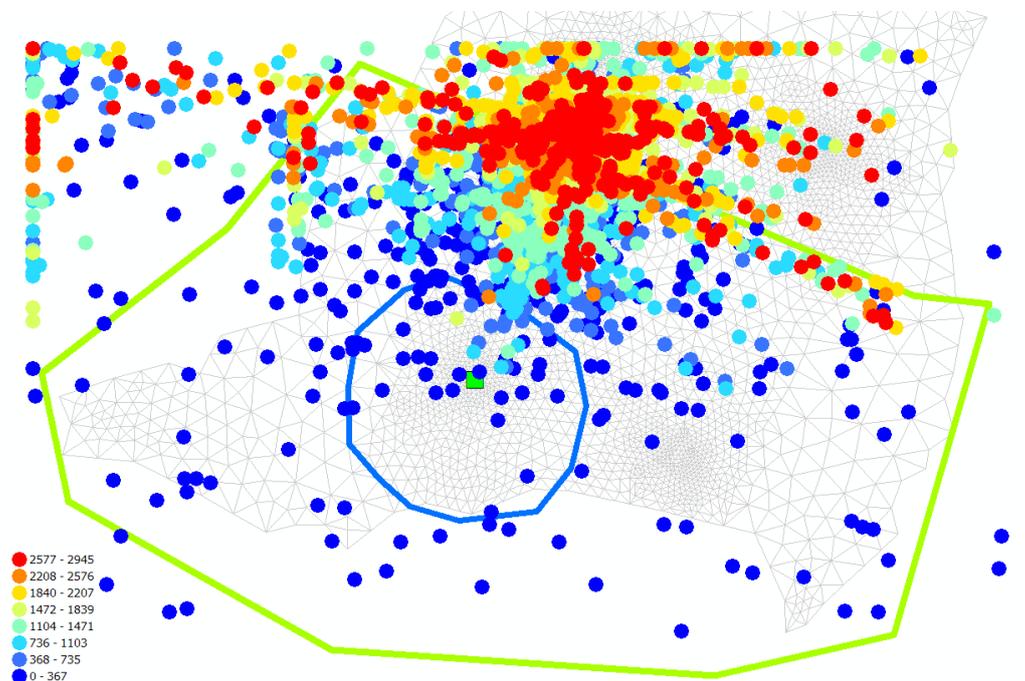


Abbildung 4: Bewegung der vom Algorithmus PSS geprüften Standorte über den Optimierungsprozess. Die Farbe der Punkte repräsentiert die Nummer des Modellaufrufs. Der blaue Umring grenzt die Zone ab, in der eine Maximalkonzentration von 50 mg/l auftreten darf. Der grüne Umring stellt die Zone der potentiellen Anlagenstandorte dar.



Ein anderes Verhalten ist der Abbildung 4 für den PSS-Algorithmus zu entnehmen. Auffällig ist zum einen die deutlich erhöhte Anzahl an getesteten Positionen. Darüber hinaus lässt sich in der Anfangsphase ein Abtasten der gesamten Zone potentieller Standorte beobachten (blaue Punkte). Im weiteren Verlauf erfolgt eine Konzentration auf einen zentralen nördlichen Bereich (grüne, gelbe und rote Punkte). Jedoch werden auch in der späteren Phase der Optimierung Positionen abseits des Konzentrationsbereiches geprüft (rote und gelbe Punkte an den Rändern). Damit zeigt sich die Eigenschaft des PSS-Algorithmus, nicht in lokalen Minima zu verharren, was letztendlich im besseren Ergebnis resultiert, aber weitaus mehr Modellaufäufe erfordert.

3.4 Ergebnisse der Optimierung Szenario 1

Es wurden drei Varianten des Szenario 1 unter Nutzung des PSS-Algorithmus betrachtet. Diese Optimierungsläufe unterscheiden sich in der Anzahl der verwendeten Sicherungsbrunnen in der Abfanganlage. Es wurden Optimierungen unter der Verwendung von einem Sicherungsbrunnen, von 2 Sicherungsbrunnen und von 5 Sicherungsbrunnen durchgeführt.

Tabelle 2: Die jeweils besten Ergebnisse der drei Varianten der Standortoptimierung des Szenario 1.

Variante des Szenarios 1	Brunnen	Menge [m ³ /d]	Rechtswert	Hochwert	Gesamtmenge
1 Sicherungsbrunnen	Brunnen 1	17279,7	3409160	5815660	17279,7
2 Sicherungsbrunnen	Brunnen 1	1866,75	3408380	5816670	5454,24
	Brunnen 2	3607,49	3411520	5817710	
5 Sicherungsbrunnen	Brunnen 1	3199,17	3406130	5814800	3291,6
	Brunnen 2	1640,9	3410350	5816370	
	Brunnen 3	45,3706	3408950	5815330	
	Brunnen 4	1553,33	3408450	5816570	
	Brunnen 5	19,987	3411560	5814440	

Die Variante unter Verwendung eines einzigen Sicherungsbrunnens zeigt, dass ein einzelner Brunnen eine Leistung von mehr als 17000 m³/d benötigt, um die geforderten Maximalkonzentrationen in Brunnennähe einzuhalten (siehe Tabelle 2). Besteht die Möglichkeit zwei Brunnen zu einer Abfanganlage zusammenzufassen, reduziert sich die Gesamtleistung deutlich, es wird weniger als ein Drittel der Leistung benötigt. Eine Anlage bestehend aus fünf Brunnen kann mit einer Leistung von knapp 3300 m³/d betrieben werden. Mit dieser Variante kann also ca. 80 % der Leistung eingespart werden.

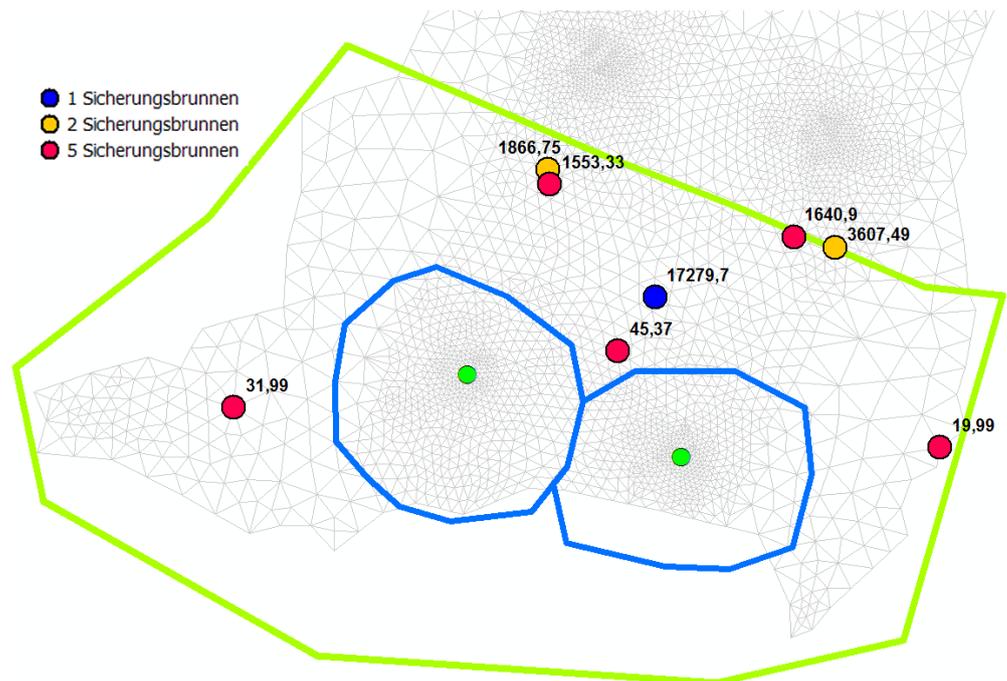


Abbildung 5: Lage der besten Ergebnisse der Standortoptimierung mit PSS für die Varianten mit einem, zwei und fünf Abfangbrunnen des Szenarios 1 mit angenommenen Pumpmengen [m³/d].

Eine Betrachtung der gefundenen Standorte kann diese deutlichen Unterschiede zum Teil erklären (siehe Abbildung 5). Es zeigt sich, dass der gefundene Standort für die singuläre Anlage zentral zwischen den Trinkwasserbrunnen und den Schadstoffquellen positioniert ist. Dies ist plausibel, da die beste Methode für diesen Fall, ein Abfangen der beiden Stofffahnen in einem Trichter ist. Für die Zweibrunnenvariante werden die Brunnen jeweils möglichst nahe an den Schadstoffquellen gelegt. Damit wird die Ausdehnung der Fahne möglichst klein gehalten. Auffällig bleibt jedoch, dass der östliche Brunnen die doppelte Menge des westlichen fördert. In der Variante, in der fünf Brunnen eingesetzt werden, werden die beiden stärksten Brunnen ebenfalls nahe an den Schadstoffquellen positioniert. Auffällig ist dabei, dass die gefundenen Standorte sehr nahe an denen der Zweibrunnenvariante liegen. Die drei weiteren Brunnen fördern jeweils nur noch ca. ein Prozent der Gesamtmenge und damit deutlich weniger als die beiden schadstoffquellennahen. Zwei dieser Brunnen scheinen strömungstechnisch auch nicht sinnvoll platziert. Der fünfte Brunnen hingegen ist unweit dem Standort der Anlage der Eibrunnenvariante zu finden. Die Vermutung liegt nahe, dass die drei Brunnen mit geringer Förderleistung keinen wesentlichen Einfluss auf die Gesamtlösung haben und wahrscheinlich wegrationalisiert werden können. Der Optimierungsjob wurde jedoch nicht vollständig abgeschlossen, sondern wurde aufgrund technischer Probleme vom System beendet. Eventuell wären die Brunnen auch im Rahmen der Optimierung weggefallen. Es ergibt sich auf jeden Fall die Aufgabe, bei künftigen Anwendungen die Standorte mit vergleichsweise marginalen Fördermengen auf ihre Notwendigkeit überprüfen zu müssen.

Es stellt sich weiterhin die Frage, wieso die Zweibrunnenvariante am östlichen Standort und damit auch gesamt deutlich mehr fördern muss, als die Fünfbrunnenvariante. Hier sind weitere Untersuchungen notwendig inklusive einer Prüfung der These, dass die Brunnen geringer Leistung der Fünfbrunnenvariante wegfallen können.

4 Test und Evaluierung unter Verwendung des Szenario 2

4.1 Wasserwirtschaftlicher Hintergrund und Werkzeuge

Der linke Niederrhein zwischen Xanten und Krefeld unterliegt in weitem Teilen bergbaulichen Einflüssen, die sich in Form von Bodensenkungen bemerkbar machen. Zur Vermeidung von Vernässungen und Gebäudeschäden werden aufwändige Dränagemaßnahmen durch ober- und unterirdische Wasserhaltungen betrieben. Die Anlagen wurden nach aufkommender Notwendigkeit in Abhängigkeit des Kohleabbaus errichtet und somit sukzessive entstanden. Im Genossenschaftsgebiet (mehr als 600 km²) sind mehr als 200 Anlagen zur Wasserhaltung und Trink- und Brauchwassergewinnung im Betrieb. Zur Bearbeitung der vielfältigen Aufgaben des Betriebs und der Planung der Grundwasserpumpenanlagen wurde für den zuständigen Wasserverband LINEG durch die WASY GmbH ein instationäres Grundwasserströmungsmodell unter der Verwendung von FEFLOW im regionalen Maßstab aufgebaut.

In absehbarer Zeit wird der Steinkohlebergbau in diesem Bereich eingestellt werden. Der Betrieb der Wasserhaltung aber ist auf Dauer angelegt und muss über die Ewigkeitskosten des Bergbaus gedeckt werden. Damit ergibt sich erstmalig die Möglichkeit und wirtschaftliche Notwendigkeit, im Rahmen altersbedingter Pumpenlagensubstitution optimale Standorte unter Berücksichtigung einer globalen Betrachtung zu suchen. Für diese Aufgabe drängt sich das Grundwasserströmungsmodell insbesondere im Zusammenspiel mit den Optimierungsalgorithmen der OPTIX-Suite geradezu auf.

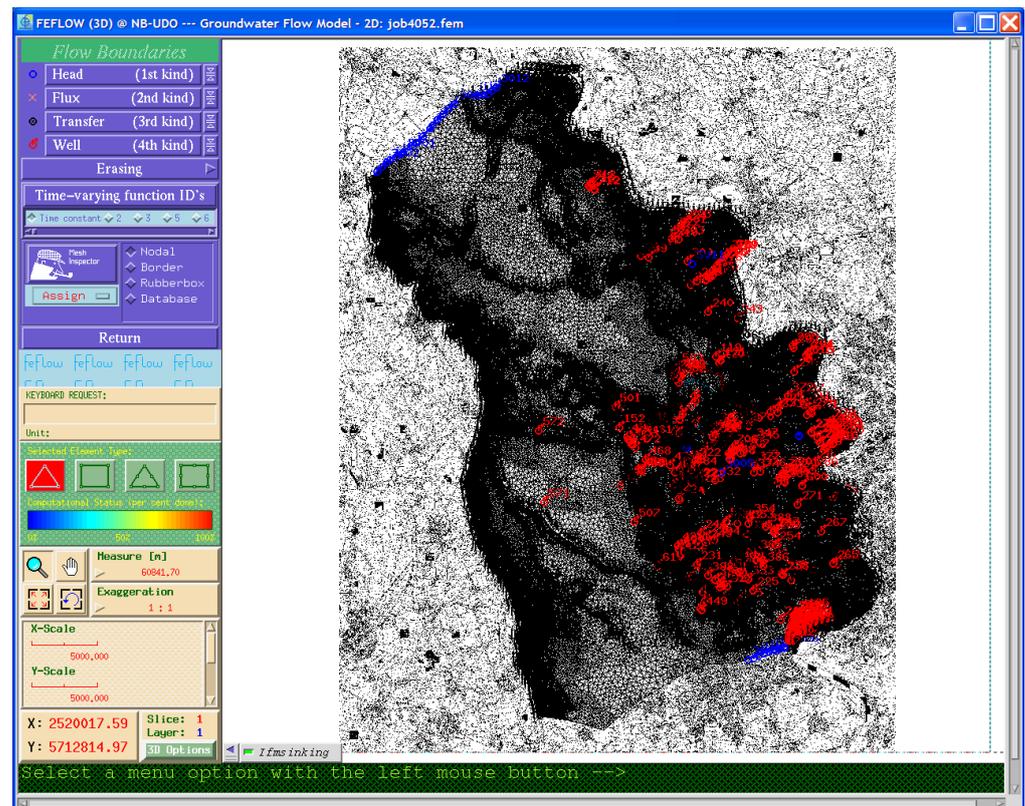


Abbildung 6: Das als Werkzeug genutzte Grundwasserströmungsmodell für den linken Niederrhein unter FEFLOW.

4.2 Auswahl des Testgebietes und Definition des Szenario 2

Zu Beginn der Arbeiten wurde ein Testgebiet aus dem zentralen Bereich des Verbandsgebietes von einer Größe von mehr als 200 km² und mit mehreren Dutzend Pumpanlagen betrachtet. Das Testgebiet erstreckte sich vom Rhein im Osten bis zur westlichen Verbandsgrenze. Es umfasste damit ca. ein Drittel des Verbandsgebietes und die Hälfte aller Brunnenknoten. Es stellte sich heraus, dass die notwendige Anzahl Pumpanlagen zur Einhaltung der gewünschten Flurabstände mit den zur Verfügung stehenden Ressourcen (maximale Parallelität 32) nicht zu bewältigen waren. Daraufhin wurde ein Testgebiet nördlich von Kamp-Lintfort mit einer Größe von ca. 20 km² ausgewählt (siehe Abbildung 7). Das Testgebiet ist stark vom Bergbau beeinflusst und hat in jüngster Vergangenheit noch Senkungen erfahren, deren wasserwirtschaftlichen Auswirkungen mit neuen Pumpanlagen entgegengewirkt werden musste.

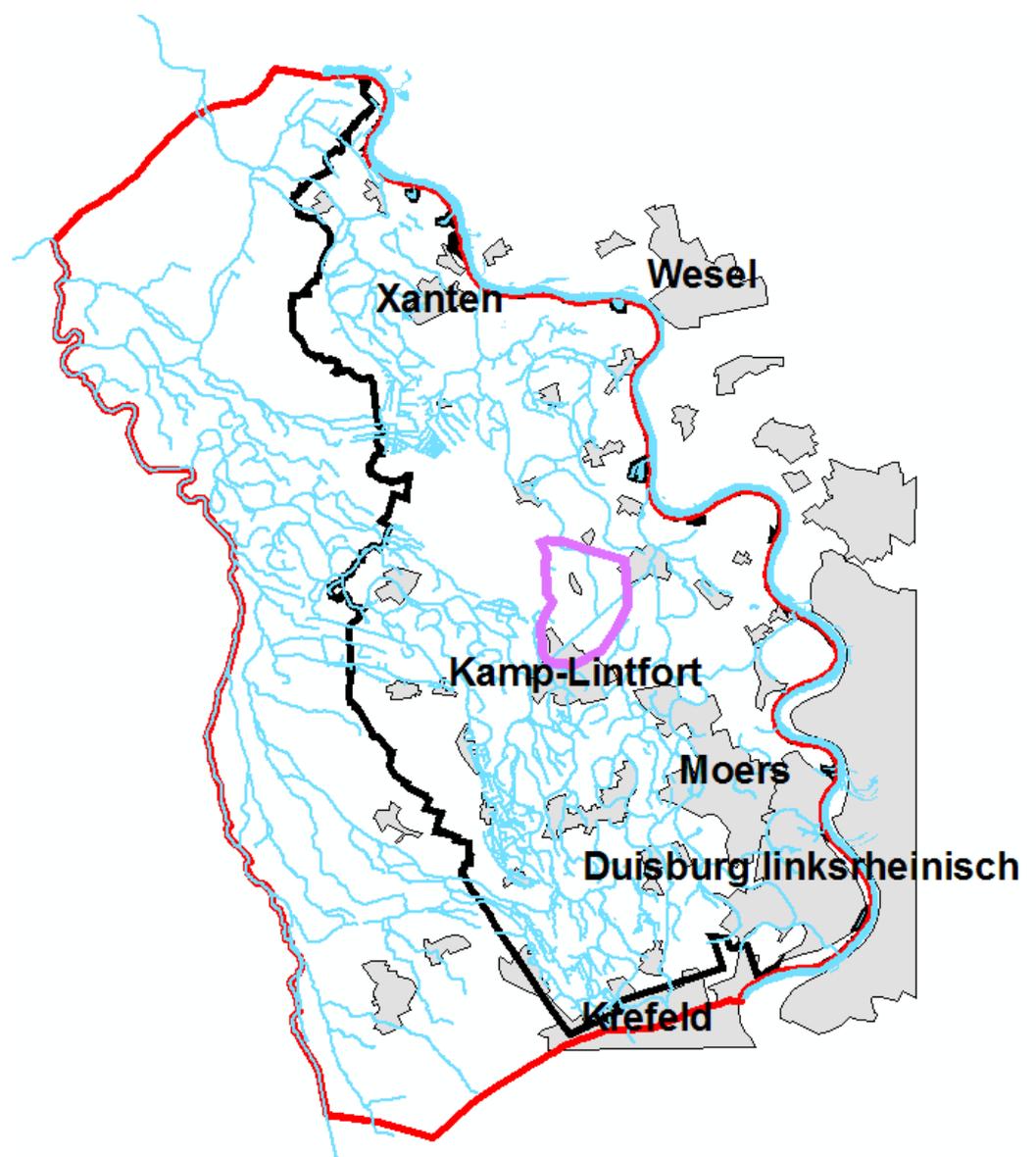


Abbildung 7: Lage des Testgebietes (violett) zu Genossenschaftsgebiet (schwarz) und Modellgebiet (rot).



Aus dem Testgebiet („test area“) wurde ein Teilgebiet („go area“) herausgenommen, in dem neue Pumpenanlagenstandorte gefunden werden sollen. Im gesamten Testgebiet jedoch ist der gegebene Flurabstand einzuhalten. Der einzuhaltende Flurabstand ist von der Landnutzung abhängig. Er wurde unter der Nutzung eines GIS aus Landnutzungsinformationen abgeleitet und unter Verwendung eines Geländemodells zu einem einzuhaltenden Wasserstand umgerechnet. Die Verteilung des einzuhaltenden Wasserstandes, und damit implizit der einzuhaltende Flurabstand, wurde als Referenzwasserstandsverteilung unter FEFLOW abgelegt. Ebenso wurden Testgebiet und das Gebiet potenzieller Anlagenstandorte als Referenzverteilung abgelegt und damit für den Optimierungsprozess verfügbar gemacht.

Für die Optimierung wurde eine quasistationäre Variante des LINEG-Regionalmodells verwendet, die den Zustand 11.2006 beschreibt. Mit Hilfe dieses Modells war für die „go area“ die notwendige Fördermenge unter Berücksichtigung des einzuhaltenden Wasserstandes in der gesamten „test area“ zu minimieren, dabei konnten die Pumpenanlagen in Lage und Leistung frei variiert werden. Verwendet wurde der Optimierungsalgorithmus PSS.

4.3 Verlauf und Ergebnis der Optimierung

In den ersten Optimierungsversuchen haben hydrogeologisch unsinnige Varianten, z.B. hohe Pumpmengen im geringmächtigen Grundwasserleiter, zu numerischen Instabilitäten geführt. Diese verhinderten eine Fortsetzung des Optimierungsjobs. Daher wurde ein Verfahren implementiert, das Modellläufe für ungültig erklärt, die Wasserstände an Brunnen aufweisen, die hydrogeologisch keinen Sinn ergeben.

Unter Einsatz dieses Mechanismus konnten zwar im Sinne der Optimierung gearbeitet werden. Da in Anlehnung an das Ausgangsmodell mit 30 Brunnenstandorten gerechnet wurde, war eine immer noch sehr hohe Zahl an Freiheitsgraden von 90 zu bewältigen. Mit den zur Verfügung stehenden Ressourcen konnte keine gültige Lösung generiert werden, d.h. keine Lösung, die den Wasserstandsvorgaben genügt.

Es wurde daher zur Reduzierung der Freiheitsgrade eine serielle Vorgehensweise gewählt. In einem ersten Schritt wurden verschiedene Optimierungsjobs zur Standortfindung gewählt, die mit unterschiedlichen Anlagenanzahlen und fixen Pumpmengen günstige Modellvarianten generieren. Dabei ist eine Variante umso günstiger, je deutlicher die Wasserstandsvorgabe (für die gesamte test area aufsummiert) eingehalten wird. Eine Variante, in der 5 Standorte für Pumpenanlagen à 3000 m³/d zu suchen waren, konnte innerhalb von 6391 Modellaufrufen keine Lösung ohne Verletzung der Wasserstandsvorgabe generieren. 2496 Modellaufrufe wurden benötigt, um eine gültige Lösung unter Verwendung von 10 Anlagen à 2000 m³/d zu erzeugen.

Diese Lösung war Ausgangspunkt für eine Optimierung der Gesamtpumpmenge unter Nutzung und Beibehaltung der gefundenen Standorte. Damit wurde die Anzahl der Freiheitsgrade auf 10 reduziert. Startwert der Pumpmengen war 5000 m³/d und Anlage. Nach 4052 Modellaufrufen wurde eine Lösung gefunden, die die im Jahr 2006 tatsächlich verwendeten Pumpraten von ca. 27 Tsd m³/d in der „go area“ um ca. 1400 m³/d und damit etwas mehr als 5 % unterbietet. Es könnten also im Gesamtjahr rechnerisch ca. ½ Mill. m³ weniger gefördert werden. Die Pumpenstandorte und die Verteilung der Pumpmengen sind der Abbildung 8 zu entnehmen. Herauszuheben ist, dass einige Standorte seitens des Algorithmus bereits wegrationalisiert wurden und andere aber noch nicht angepasst wurden. Daher ist davon auszugehen, dass noch bessere Lösungen gefunden werden können. Aufgrund von technischen Problemen wurde der Optimierungsjob systemseitig abgebrochen und wird zur Zeit der Berichtstellung neu berechnet.

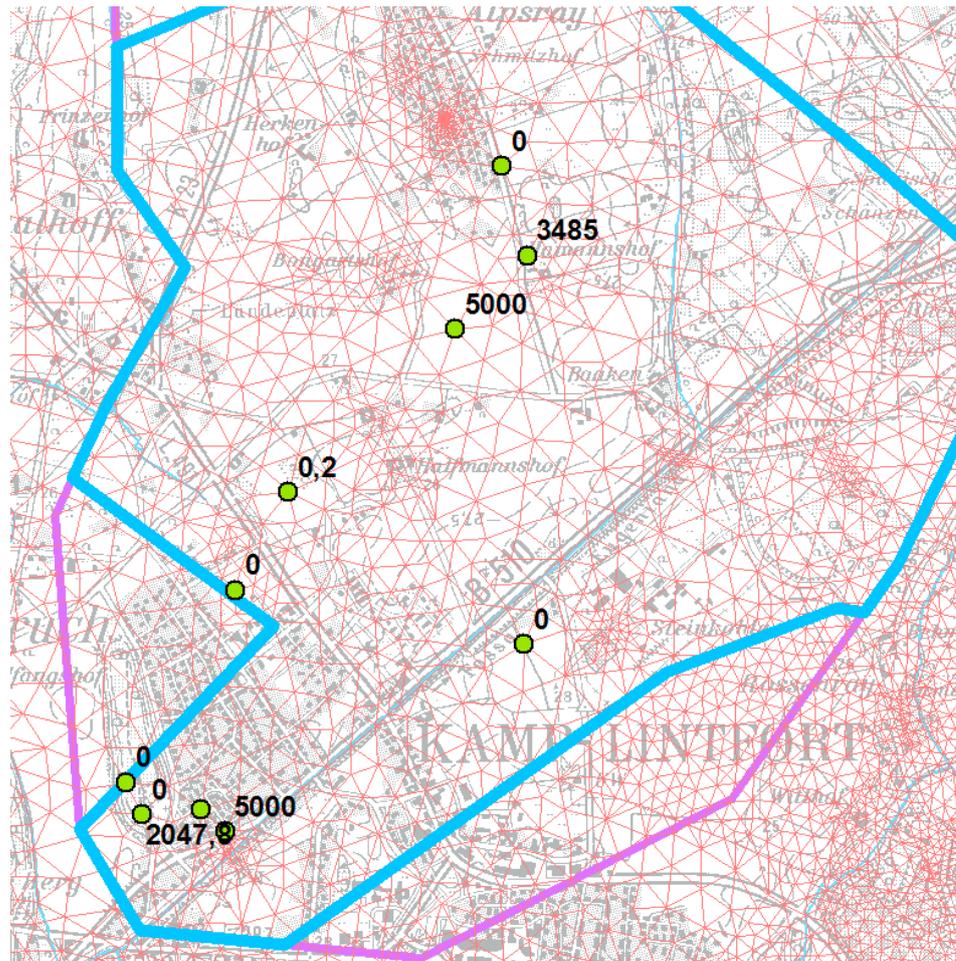


Abbildung 8: Lage und Pumpmengen [m³/d] der bisher besten gültigen Lösung für die Optimierung im Bereich Saalhof.