

Abschätzung der approximativen Zuströmbereiche in der Modellregion Thurtal

Im Auftrag des Bundesamts für Umwelt BAFU

Hinweis: Diese Studie/dieser Bericht wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.



SIMULTEC AG, KraftWerk1, Hardturmstr. 261, CH-8005 Zürich
Tel: 044 563 86 20, Fax: 044 563 86 29, E-Mail: info@simultec.ch, <http://www.simultec.ch>

Zürich, 12. Dezember 2024

Approximative Zuströmbereiche Modellregion Thurtal

Inhalt

1	Einleitung, Ziel	1
2	Grundwasserleiter	2
3	Grundwassermodell	3
4	Methodik	4
4.1	Vorgehen nach der Wegleitung des BUWAL	4
4.2	Fliesswegverfahren	4
4.2.1	Bilanzierung entlang der Fliessweg	4
4.2.2	Zeitabhängigkeit des Zustroms.....	5
4.2.3	Berücksichtigung der Heterogenität.....	5
4.3	Inverse Transportmodellierung	7
5	Approximative Zuströmbereiche im Thurtal.....	7
5.1	Angesetzte Fördermengen	7
5.2	Resultierende Fassungseinzugsgebiete	8
5.3	Abschätzung der Zuströmbereiche	12
6	Literatur.....	15

1 Einleitung, Ziel

Anlass	Bundesrat Albert Rösti, Vorsteher des Eidgenössischen Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK) und die Regierungsrätinnen und Regierungsräte der Bau-, Planungs- und Umweltdirektoren-Konferenz (BPUK) wünschen sich im Hinblick auf die geplante Vernehmlassung der GSchG-Anpassung im Sommer 2025 eine bessere Vorstellung über die Auswirkungen der Zuströmbereiche auf ausgewählte Regionen (sogenannte Modellregionen).
Modellregionen	In drei Modellregionen soll aufgezeigt werden, welche Flächen künftig in Zuströmbereichen liegen dürften. Hierzu werden die Zuströmbereiche in den Modellregionen nicht präzise ermittelt, sondern sie sollen als plausible Flächen dargestellt werden. Die Firma pbplan AG wird dies für alle drei Modellregionen in einem Faktenblatt visualisieren und ganz kurz beschreiben. Zusätzlich wird pbplan AG mittels GIS-Analyse auswerten, welcher Flächenanteil an Ackerbau- und Spezialkulturen sowie Siedlungsgebiet in den jeweiligen Modellregionen innerhalb der approximativen Zuströmbereiche liegt
Thurtalmodell	Die Simultec AG hat im Hinblick auf das Hochwasserschutzprojekt Weinfelden-Bürglen im Auftrag des Kantons Thurgau ein numerisches Grundwassermodell des Thurtals aufgebaut. Das Modell wurde anschliessend bis Schönenberg erweitert und für verschiedene Aufgabenstellungen eingesetzt. Das aktuelle Modell umfasst den Zeitraum von 2011 bis 2021.
Transport	Im Jahr 2014 wurde das Thurtalmodell zu einem regionalen Stoff- und Wärmetransportmodell erweitert. Die Netzfeinheit dieser Modelle erlaubt deshalb auch Transportrechnungen. Bei der gewählten Netzfeinheit ist allerdings immer noch mit einer gewissen numerischen Dispersion zu rechnen. Beim Einsatz für die Wärmetransportmodellierung werden deshalb noch stärker verfeinerte Modelllupen eingesetzt.
Ziel	Das bestehende Thurtalmodell soll für die Bestimmung der Zuströmbereiche aller Trinkwasserfassungen zwischen Weinfelden und Niederneunforn eingesetzt werden. Das Grundwassermodell des Thurtals wurde nicht im Hinblick auf die Bestimmung von Zuströmbereichen aufgebaut. Es wurden auch keine spezifischen Felduntersuchungen durchgeführt. Deshalb kann eine Bestimmung der Zuströmbereiche nur approximativ erfolgen.

2 Grundwasserleiter

Entstehung	Der Felstrog des Thurtals wurde durch die Vorstösse von Gletscherzungen geformt. Nach dem Rückzug der Gletscher staute sich hinter der Engstelle bei Gütighausen sich ein See, an dessen Grund feinkörnige Sedimente abgelagert wurden. Darüber lagerte die Thur mächtige Schotter ab. Diese Schotter bilden den Grundwasserleiter des Thurtals.
Geometrie	Die Mächtigkeit des Grundwasserleiters beträgt im Gebiet von Weinfeldern etwa 20 m. Nach Westen nimmt die Mächtigkeit ab, westlich von Frauenfeld beträgt sie noch etwa 5 bis 10 m. Während im Osten der Flurabstand des Grundwasserspiegels bis zu 10 m beträgt, gelangt das Grundwasser im Westen an die Oberfläche und wird durch die beidseitig der Thur angeordneten Binnenkanäle und weitere Drainagegräben abgeführt.
Grundwasser	Der Thurtalschotter ist sehr durchlässig. Die Durchlässigkeiten liegen zwischen 5×10^{-3} und 1×10^{-2} m/s. Abbildung 1 zeigt ein Querprofil durch den Thurtalschotter bei den Grundwasserfassungen Bussnang und Schachen. Der Grundwasserleiter wird primär durch Infiltration aus der Thur gespeist. Die Grundwasserneubildung aus Niederschlag und der Zufluss von den seitlichen Talhängen sind von kleinerer Bedeutung.

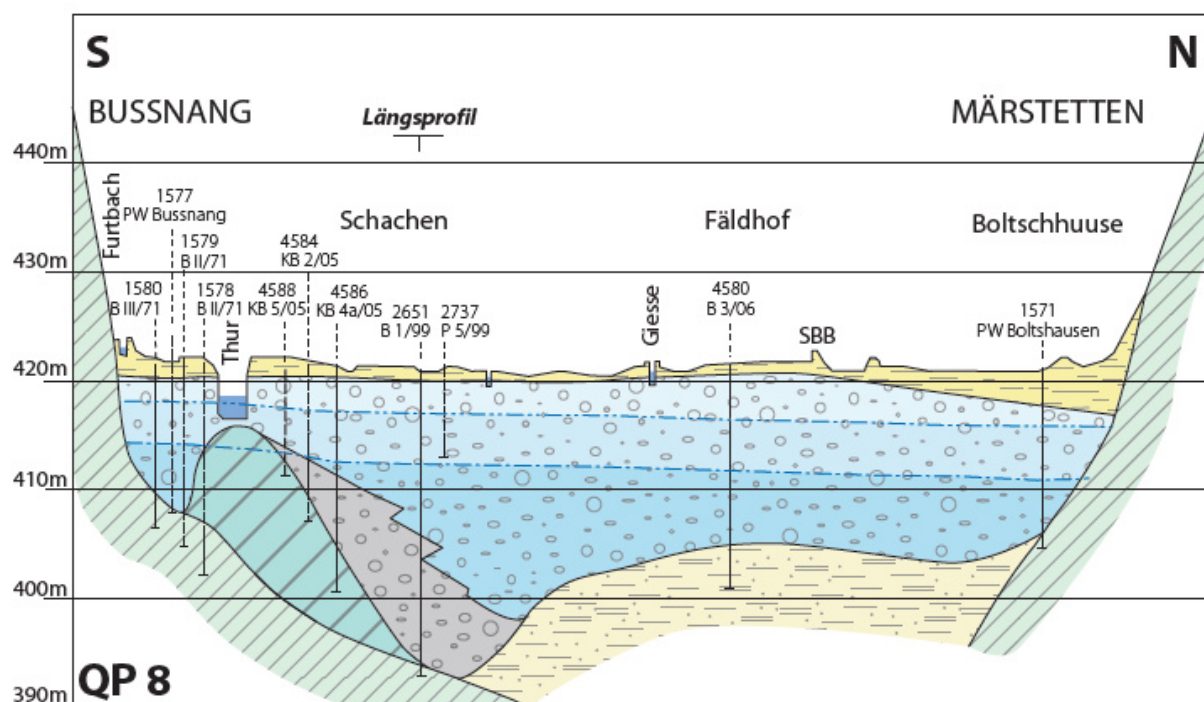


Abbildung 1: Querprofil durch den Grundwasserleiter bei den Fassungen Bussnang und Schachen

Nutzung	Der Grundwasserleiter des Thurtals ist von grosser Bedeutung für die Trinkwasser- und Brauchwasserversorgung des Kanton Thurgau. Insgesamt werden heute im Abschnitt zwischen Schönenberg und Neunforn jährlich etwa 8.5 Mio. m ³ Grundwasser gefördert.
---------	---

3 Grundwassermodell

2D-Modell

Das Grundwassermodell umfasst den Thurtalschotter zwischen Schönenberg und Gütighausen, sowie den Murg-Schotterfächer bei Frauenfeld. Die darunterliegenden Seeablagerungen und Grundmoränen sowie der Molassefels werden im numerischen Modell als Stauer betrachtet. Im Thurtalschotter existieren mit Ausnahme der oberflächlichen Deckschichten keine über grössere Distanzen durchgehende, schlecht durchlässige Schichten. Der Grundwasserleiter bildet eine zusammenhängende Einheit, seine Mächtigkeit ist im Vergleich zur horizontalen Ausdehnung klein. Deshalb kann der Thurtalschotter im regionalen Massstab mit einem horizontal-zweidimensionalen Grundwassermodell abgebildet werden.

Thur

Die grösste Speisung des Grundwasserleiters erfolgt aus der Thur. Jährlich infiltrieren mehr als 80 Mio. m³ Thurwasser in den Grundwasserleiter. Ein grosser Teil davon wird nach kurzer Fliessdistanz wieder durch die Binnenkanäle gefasst und zurück in die Thur geleitet. Die Infiltration aus der Thur wird stark vom Thurabfluss beeinflusst. Zudem wird bei Hochwasser die Kolmationsschicht der Thursohle aufgerissen und bildet sich erst allmählich wieder neu. Dies wird mit einer zeitabhängigen Sohlendurchlässigkeit berücksichtigt.

Neubildung

Die Grundwasserneubildung aus Niederschlag wird beim Thurtalmodell vorgängig in einem Bodenwasserhaushaltsmodell berechnet. Die landwirtschaftliche Bewässerung wird in der Bilanz des Bodenwasserhaushaltsmodells berücksichtigt. In den bewässerten Gebieten kann die Grundwasserneubildung im Sommer deshalb auch negativ sein. Abbildung 2 zeigt die im Modell berücksichtigten Vegetationszonen.

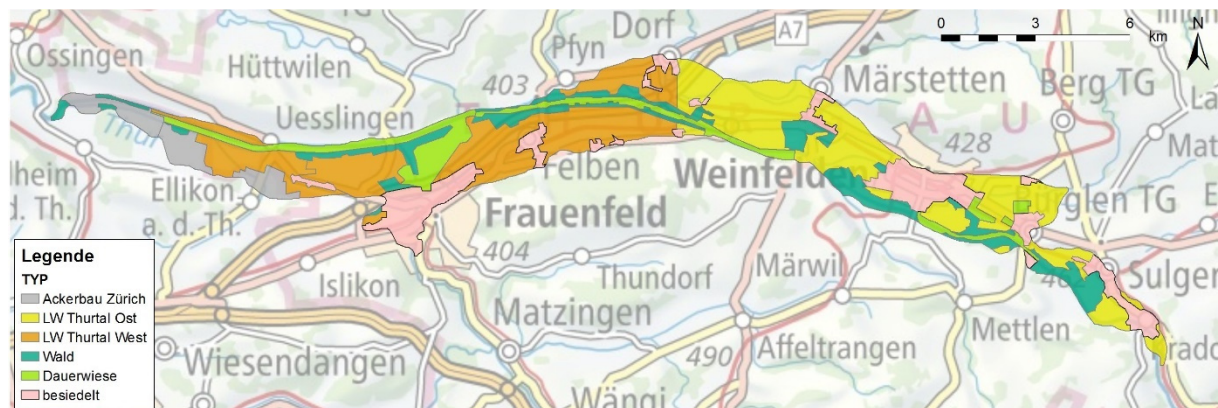


Abbildung 2: Vegetationszonen zur Berechnung der Grundwasserneubildung

Seitenzuflüsse

Den Seitenzuflüssen wurde bei der Modellierung bisher nur wenig Beachtung geschenkt, da sie aufgrund der schlechten Durchlässigkeit der Talhänge klein ist. Die Gesamtmenge wurde abschnittsweise mit dem Bodenwasserhaushaltsmodell abgeschätzt und gleichmässig auf den Rand verteilt.

4 Methodik

4.1 Vorgehen nach der Wegleitung des BUWAL

Praxishilfe	Gemäss der Praxishilfe des BUWAL [5] wird zur Ermittlung des Zuströmbereiches zuerst das Fassungseinzugsgebiet bestimmt. Anschliessend wird über die Aufsummierung der Grundwasserneubildung (aus Niederschlag und Gewässern) diejenige Fläche bestimmt, aus welcher 90% des geförderten Grundwassers stammt. Die Praxishilfe äussert sich nicht zu zeitabhängigen Effekten und zu den Unsicherheiten bei der Bestimmung des Fassungseinzugsgebietes.
Document de base	Im Gegensatz zur Praxishilfe wird im document de base [6] die 90%-Regel klar definiert als Anteil des Fassungseinzugsgebiets, welches 90% zur Fördermenge beiträgt und bezogen auf seine Fläche die höchste Beitragsrate (= Neubildungsrate x Fassungswahrscheinlichkeit) aufweist. In den Beispielen wird die Beitragsrate als abhängig von der Zeit und den inhomogenen Verhältnissen dargestellt. Lücken zwischen Zuströmbereichen und der Fassung sind möglich.
Auswahl	Für die Ermittlung der approximativen Zuströmbereiche im Thurtal wurde bezüglich der Bilanzierung die Methodik der Praxishilfe angewendet

4.2 Fliesswegverfahren

4.2.1 Bilanzierung entlang der Fliessweg

Verfahren	Zur Ermittlung der Zuströmrichtungen, Fliesszeiten und des Thuranteils am geförderten Grundwasser wird das Fliesswegverfahren eingesetzt. Es handelt sich um ein modifiziertes Verfahren der Fliesswegberechnung nach Cordes & Kinzelbach [3][4]. Bei diesem Verfahren wird als Erstes mit Hilfe sogenannter „Patches“ ein kontinuierliches Geschwindigkeitsfeld berechnet. Am Rand des Patches, welcher die Grundwasserfassung enthält, werden 100 Fliesswege gestartet und entlang des Geschwindigkeitsfeldes rückwärts verfolgt. Die Bilanzmenge jedes Fliessweges umfasst am Anfang 1/100 der Fördermenge. In jedem Patch, der vom Fliessweg durchquert wird, wird die über die Randbedingungen oder die Speicherveränderung hinzugekommene Wassermenge von der Bilanzmenge des Fliessweges abgezogen. Die Fliesswege werden gestoppt, sobald die übrigbleibende Bilanzmenge Null erreicht.
Bilanzierung	Aus der Bilanzierung entlang aller Fliesswege kann zu jedem Zeitpunkt für das geförderte Wasser die Herkunft, der Anteil aus den Randbedingungen oder der Speicherveränderung und der Zeitpunkt des Eintretens in den Grundwasserleiter, bzw. das Grundwasseralter, bestimmt werden

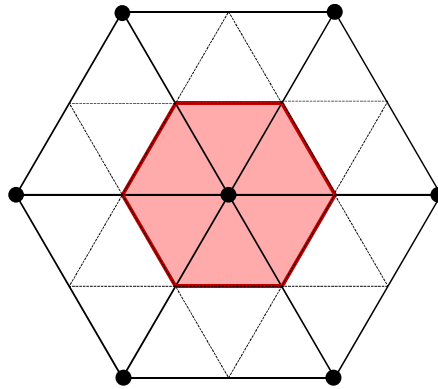


Abbildung 3: Ausschnitt aus einem Finite-Elemente-Netz mit Patch-Fläche (rot) eines Knotens.

4.2.2 Zeitabhängigkeit des Zustroms

Verfahren

Da die Infiltration aus der Thur von deren Abfluss abhängt und damit zeitlich stark variiert, sind die Einzugsgebiete der Trinkwasserfassungen zeitabhängig. Wird ein Fliesswegverfahren zur Bestimmung der Fassungseinzugsgebiete (FEG) eingesetzt, so können diese zu verschiedenen Zeiten gestartet werden und ergeben dann jeweils das für den Eintreffenszeitpunkt gültigen FEG. Das gesamte Fassungseinzugsgebiet wird aus der Umhüllenden aller rückwärts verfolgten Fliesswege bestimmt.

4.2.3 Berücksichtigung der Heterogenität

Hydrodynamische Dispersion

Grundwassermodelle betrachten den Untergrund bereichsweise als homogen. In Wirklichkeit bestehen die Grundwasserleiter aus einem heterogenen Muster von durchlässigen und weniger durchlässigen Bereichen und die Fliesswege des Grundwassers sind nicht geradlinig. Die kleinräumigen Strukturen des Untergrundes können jedoch nicht erkundet werden, da dafür zu viele Bohrungen und Pumpversuche erforderlich wären. In der Stofftransportmodellierung behilft man sich deshalb mit dem Konzept der «hydrodynamischen Dispersion» und verwendet zu deren Berechnung das Ficksche Gesetz (Diffusionsgleichung). Das Gesetz leitet sich ursprünglich aus der zufälligen thermischen Bewegung von Teilchen ab. Hydrodynamische Dispersion setzt sich zusammen aus der Diffusion (Ausgleich von Konzentrationen), aus der korngerüstbedingten Dispersion (unterschiedliche Geschwindigkeiten in den Poren) und der durch die Inhomogenität des Untergrundes verursachten Makrodispersion.

Dispersion

Im Grössenmassstab eines Zuströmbereiches können die Diffusion und die korngerüstbedingte Dispersion vernachlässigt werden. Massgebend ist allein die Makrodispersion. Im Grundwasserleiter ist jedoch die Abweichung der Strömung vom Verhalten im idealen homogenen Medium nicht zufällig, sondern durch die Heterogenität des Untergrundes bedingt und daher immer gleich. Das Konzept der hydrodynamischen Dispersion kann deshalb nur zur Beschreibung der Unsicherheit über die Verteilung der Durchlässigkeitsstrukturen im Untergrund verwendet werden.

- Umsetzung In den Fliesswegverfahren kann die Heterogenität des Untergrundes auf zwei Arten berücksichtigt werden:
- Random-Walk-Verfahren
 - Geostatistische Verfahren
- Random Walk Beim Random-Walk-Verfahren wird der advektiven Bewegung des Wasserteilchens in jedem Zeitschritt eine zufällige Bewegung überlagert. Das Verfahren scheitert, wenn das Fassungseinzugsgebiet ein infiltrierendes Gewässer erreicht. Da entlang der Fliesswege keine Wasserbilanz berechnet werden kann, wird die Infiltration nicht bemerkt und der Fliessweg setzt sich auf der gegenüberliegenden Seite des Gewässers fort. Die zufällige Bewegung kann zudem auch Gewässer oder Dichtwände überspringen
- Geostatistik Beim Geostatistischen Verfahren wird die Heterogenität des Untergrundes direkt abgebildet. Um die räumliche Variabilität der Fliessrichtung auf Grund der Inhomogenitäten im Untergrund zu berücksichtigen, werden mehrere (mindestens 100) heterogene Durchlässigkeitsverteilungen nach geostatistischen Gesetzmässigkeiten erzeugt (Monte-Carlo-Methode). Soll eine Anisotropie entlang der Talachse berücksichtigt werden so muss das Finite-Elemente-Netz vorgängig parallel zur Talachse verzerrt werden. Für jede Durchlässigkeitsverteilung (Realisation) werden die Strömung und anschliessend die Fliesswege nach dem Fliesswegverfahren nach Cordes berechnet. Die Zeitabhängigkeit kann dabei ebenfalls berücksichtigt werden. Die Auswertung erfolgt vorzugsweise in einem regelmässigen Raster, zum Beispiel mit der Methode nach Bresenham.

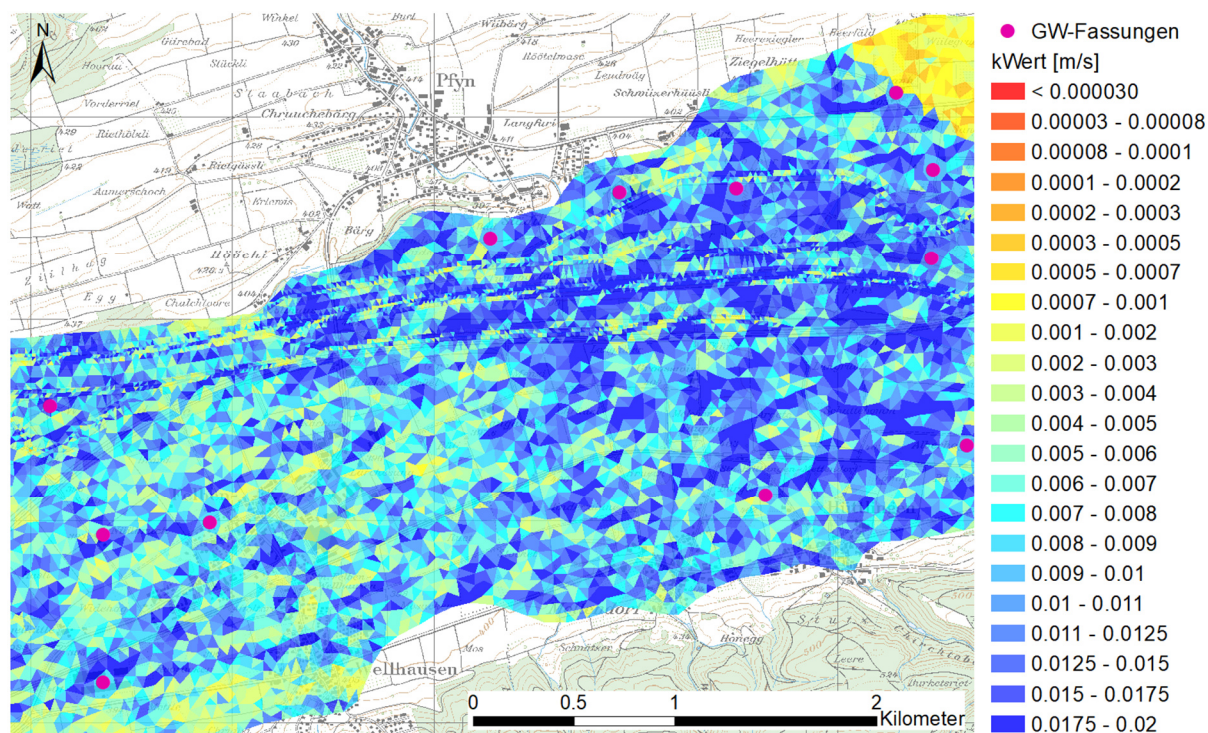


Abbildung 4: Realisation einer geostatistisch verteilten Durchlässigkeit

4.3 Inverse Transportmodellierung

Inverses Fliessfeld	Wird das Fliessfeld einer Grundwasserströmungsberechnung invertiert, so kann die Herkunft des in einer Fassung geförderten Wassers mit einer Transportrechnung bestimmt werden. In der Fassung wird ein Stoff mit einer Konzentration von 1 vorgegeben und seine Ausbreitung rückwärts in der Zeit und rückwärts im Fliessfeld berechnet.
Dispersivität	Bei der Transportmodellierung wird die Makro-Dispersion mit Hilfe von longitudinalen und transversalen Dispersivitätswerten beschrieben. Die Dispersivitätswerte sind abhängig von der Längenskala des Transportweges und damit von der Zeitskala der Fragestellung. Bei der Bestimmung der Fassungseinzugsgebiete ist eine Festlegung schwierig, da die Längenskala von 100 Metern bis mehrere Kilometer reichen kann. Nach Kinzelbach [8] beträgt die Längsdispersivität bei einer Längenskala von 100 m etwa bei 3, bei einer Längenskala von 1 km etwa bei 20 anzusetzen. Das Verhältnis von Quersdispersivität zur Längsdispersivität wird mit 0.01 bis 0.3 angegeben.
Feflow	In Feflow wird die inverse Transportmodellierung als «Exit Probability» bezeichnet. Mit der Methode kann die Herkunftswahrscheinlichkeit eines Wasserteilchens in Abhängigkeit des Ortes bestimmt werden. Es wird keine Bilanzierung durchgeführt. Die Bilanzierung muss daher nachträglich über die Multiplikation der Herkunftswahrscheinlichkeit mit der Grundwasserneubildung durchgeführt werden.
Anwendungsgrenzen	Die Exit-Probability-Methode berücksichtigt infiltrierende Gewässer korrekt. Bei 2D-Modellen wird bei der Unterquerung von exfiltrierenden Gewässern die Stoffkonzentration nicht entsprechend der (inversen) Verdünnung reduziert. Eine Berücksichtigung kann über python-Skripte erfolgen, ist jedoch bei zeitabhängigem Wechsel von Exfiltrations- und Infiltrationsstrecken entlang von Gewässern sehr aufwändig. Die Exit-Probability-Methode startet zudem immer bei Simulationsende. Soll ein zeitabhängiges Verhalten untersucht werden, so muss die aus der Strömungsberechnung resultierende Datei vorgängig in Dateien mit verschiedenen Simulationsenden abgespeichert werden.

5 Approximative Zuströmbereiche im Thurtal

5.1 Angesetzte Fördermengen

Fördermenge	Vorgängig zur Bestimmung der Fassungseinzugsgebiete resp. der Zuströmbereiche muss die relevante Fördermenge festgelegt werden. Nach der BAFU-Praxishilfe zur Ausscheidung der Zuströmbereiche [5] ist die Bemessungswassermenge durch die Behörde, hier der Kanton Thurgau resp. Zürich, festzulegen.
Festlegung	Die BAFU-Praxishilfe empfiehlt die Verwendung der mittleren Fördermenge als Bemessungswassermenge. Für die Bemessung der Fassungseinzugsbereiche im Thurtal hat der Kanton Thurgau die Fördermenge zu 120% der effektiven mittleren Entnahme der letzten 10 Jahre

festgelegt. Für die Fassungen im Untersuchungsgebiet entspricht dies rund 50 – 100% der Konzessionswassermenge.

Tabelle 1:

Zusammenstellung der Jahreskonzession, mittlere effektive Förderung im Zeitraum 2011 – 2021 sowie die im Modell implementierte Förderung und deren Anteil an der Konzession.

Fassung	Konzession [m³/Jahr]	Mittlere effektive Förderung 2011- 2021 [m³/Jahr]	Im Modell imple- mentiert [m³/Jahr]	Anteil an Konzes- sion [%]
Äuli	300'000	123'005	147'606	49
Hüttlingen	70'000	13'870	39'785	57
Feldi	700'000	584'730	701'676	100
Uesslingen	75'000	27'010	32'412	43
Foren	1'200'000	511'000	613'200	51
Wuhr	1'200'000	521'220	625'464	52
Widen	2'500'000	2'161'165	2'593'398	104
Neuwies	120'000	100'375	120'450	100
Obere_Au	120'000	60'590	72'708	61
In_der_Thur	400'000	286'890	344'268	86
Gugel_1	1'945'000	1'300'860	1'561'032	80
Gugel_2	1'945'000	1'238'445	1'486'134	76
Schachen	1'900'000	757'375	908'850	48
Summe	11'405'000	6'964'930	8'357'916	73

5.2 Resultierende Fassungseinzugsgebiete

Die Ermittlung der Fassungseinzugsgebiete erfolgte basierend auf den oben beschriebenen Methoden zur Berechnung der Herkunftswahrscheinlichkeit (Fliesswegverfahren und inverse Transportmodellierung). Nachfolgend sind exemplarisch für die Fassung Gugel2 die nach den beiden Methoden berechnete Herkunftswahrscheinlichkeit und das daraus abgeleitete Fassungseinzugsgebiet dargestellt.

Fliesswege

Abbildung 5 zeigt den mit dem stationären Fliesswegverfahren berechneten Zustrom zur Fassung Gugel2 bei Mittelwasser. Der grösste Teil des geförderten Grundwassers stammt aus der Thur. Einige

Fliesswege unterqueren zwar vorerst die Thur, enden dann aber weiter talaufwärts doch wieder in der Thur.

Fliesswege mit Geo-statistik

Abbildung 6 zeigt die Herkunftswahrscheinlichkeit bestimmt nach dem instationären Fliesswegverfahren kombiniert mit 100 Realisationen eines heterogenen Untergrundes nach der Monte-Carlo-Methode. Über 5 Jahre wurden alle 14 Tage 20 Fliesswege um den Brunnen gestartet und rückwärts verfolgt. Die Auswertung erfolgte aus Zeitgründen auf dem Finite-Elemente Netz. Für eine feinere räumliche Auflösung der Herkunftswahrscheinlichkeit müssten mehr Fliesswege um den Brunnen gestartet und in einem feineren, regelmässigen Raster ausgewertet werden.

Bei den geostatistischen Verfahren sollte nur das 95%-Perzentil der resultierenden Wahrscheinlichkeitsverteilung als Einzugsgebiet bezeichnet werden, da unter den 100 Realisationen auch einige Modelle mit extremen Durchlässigkeitsverteilungen sein können.

Exit probability

Die Berechnung der Herkunftswahrscheinlichkeit nach der inversen Transportmodellierung („exit probability“) ist in Abbildung 7 dargestellt. Für die Längs- und Querdispersivität wurden die Werte 10 und 1 m angenommen.

Aus der Kombination der beiden Methoden wurde für die Ausscheidung des Fassungseinzugsgebietes die Umhüllende Fläche gezeichnet (Abbildung 8). In Abbildung 9 und Abbildung 10 sind die Fassungseinzugsgebiete der restlichen Fassungen abgebildet.

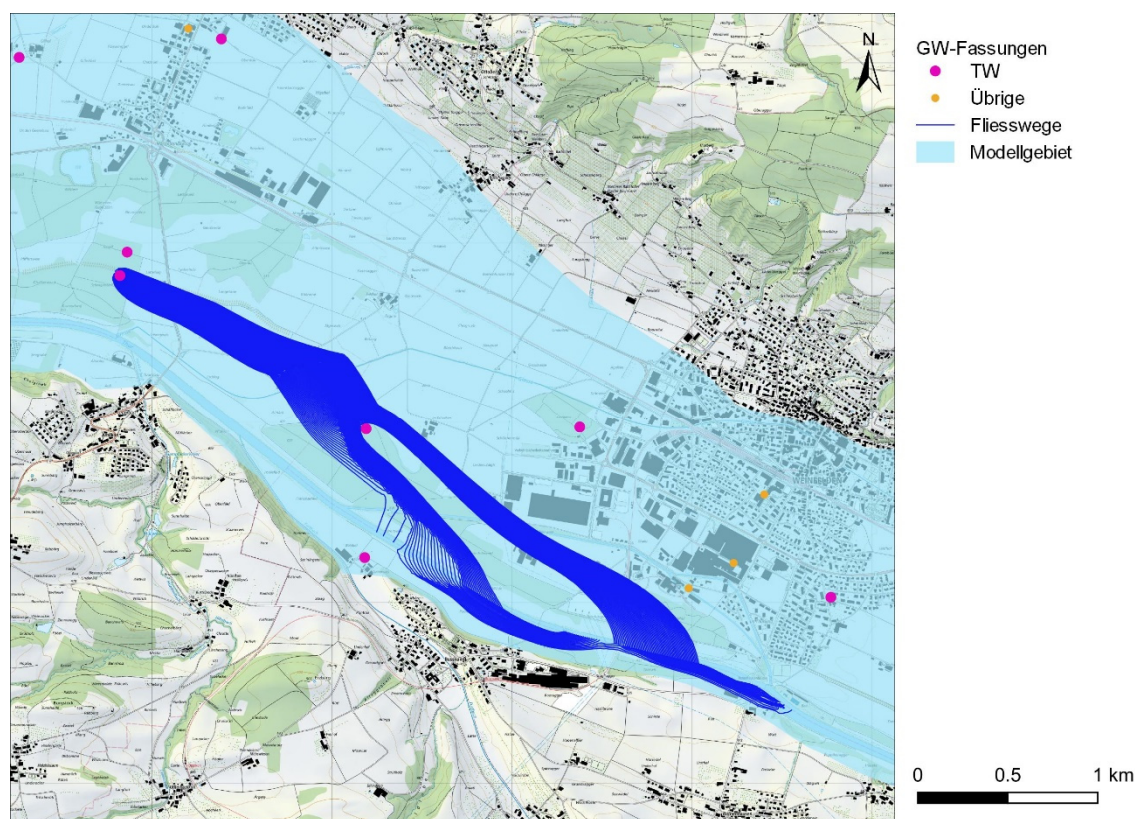


Abbildung 5: Resultierende Fliesswege (stationär, Mittelwasser)

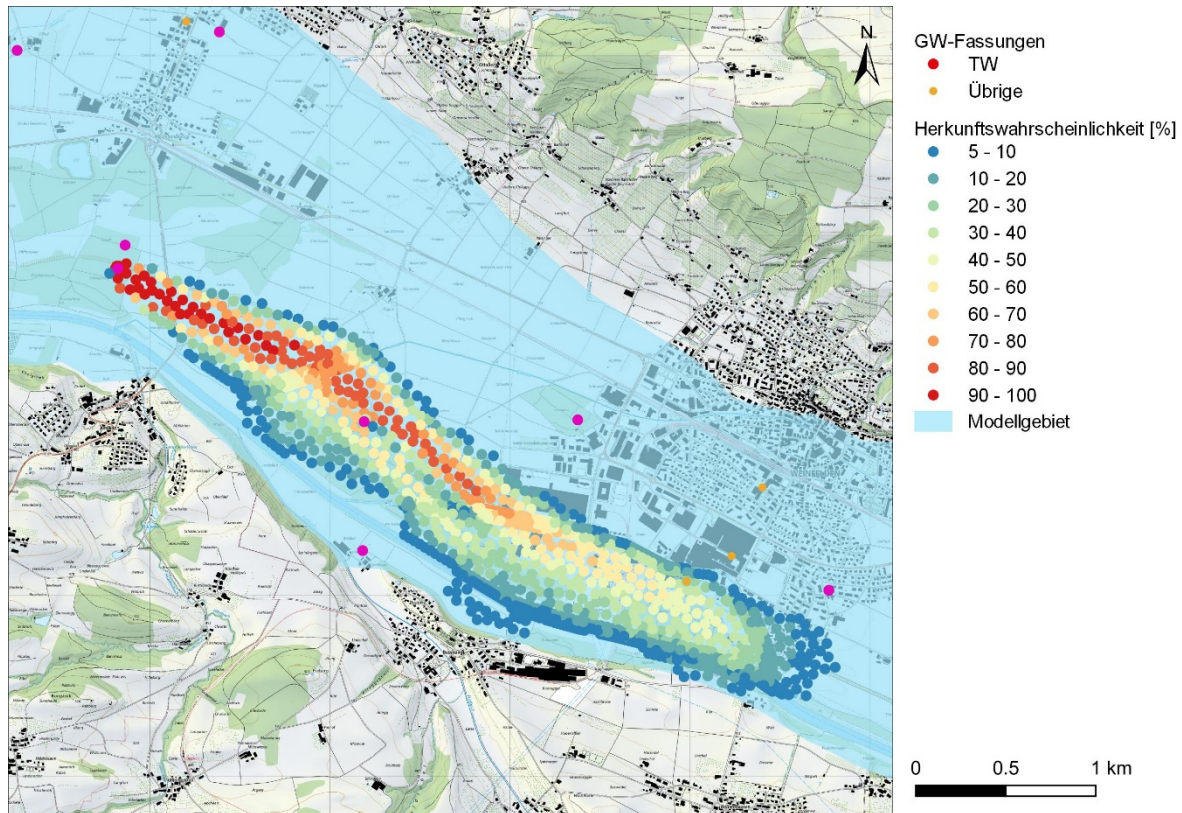


Abbildung 6: Mit Fließwegverfahren und Monte-Carlo-Methode berechnetes Einzugsgebiet (95% Herkunftswahrscheinlichkeit)

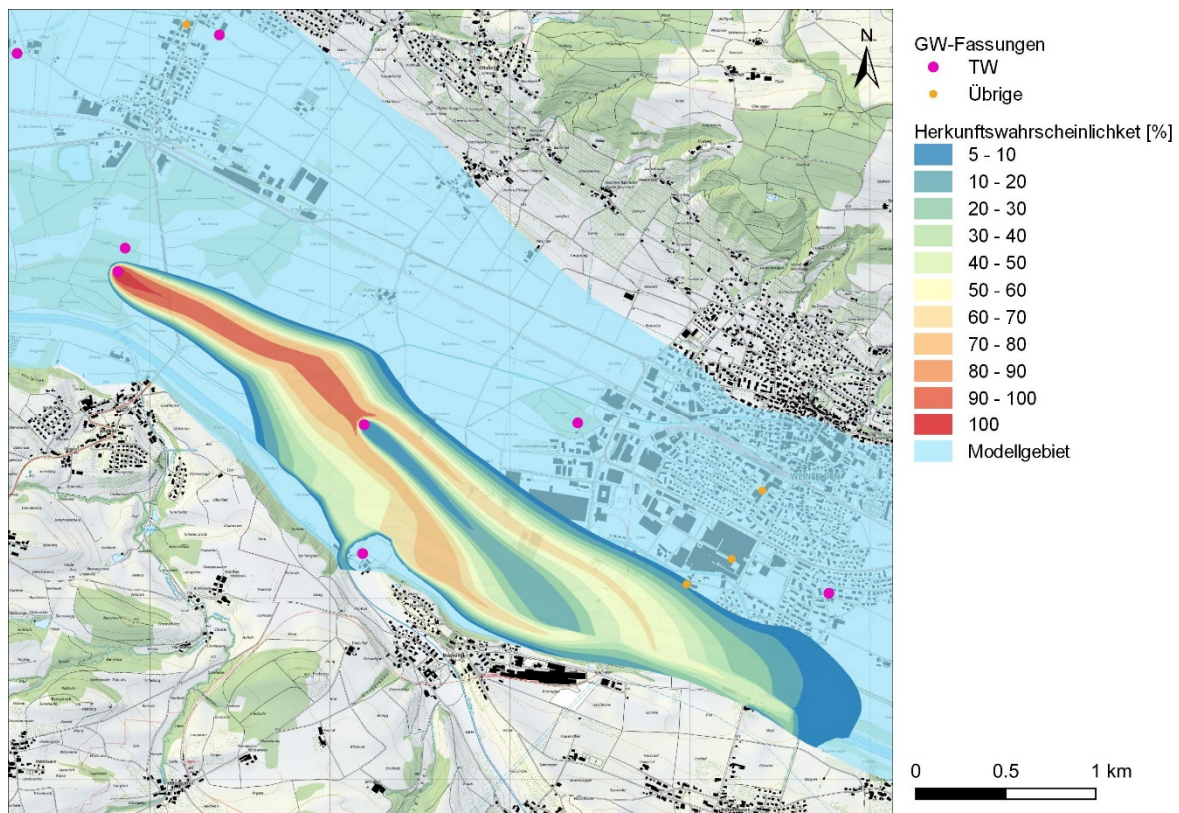


Abbildung 7: Mit exit probability berechnetes Einzugsgebiet (stationär, Mittelwasser)

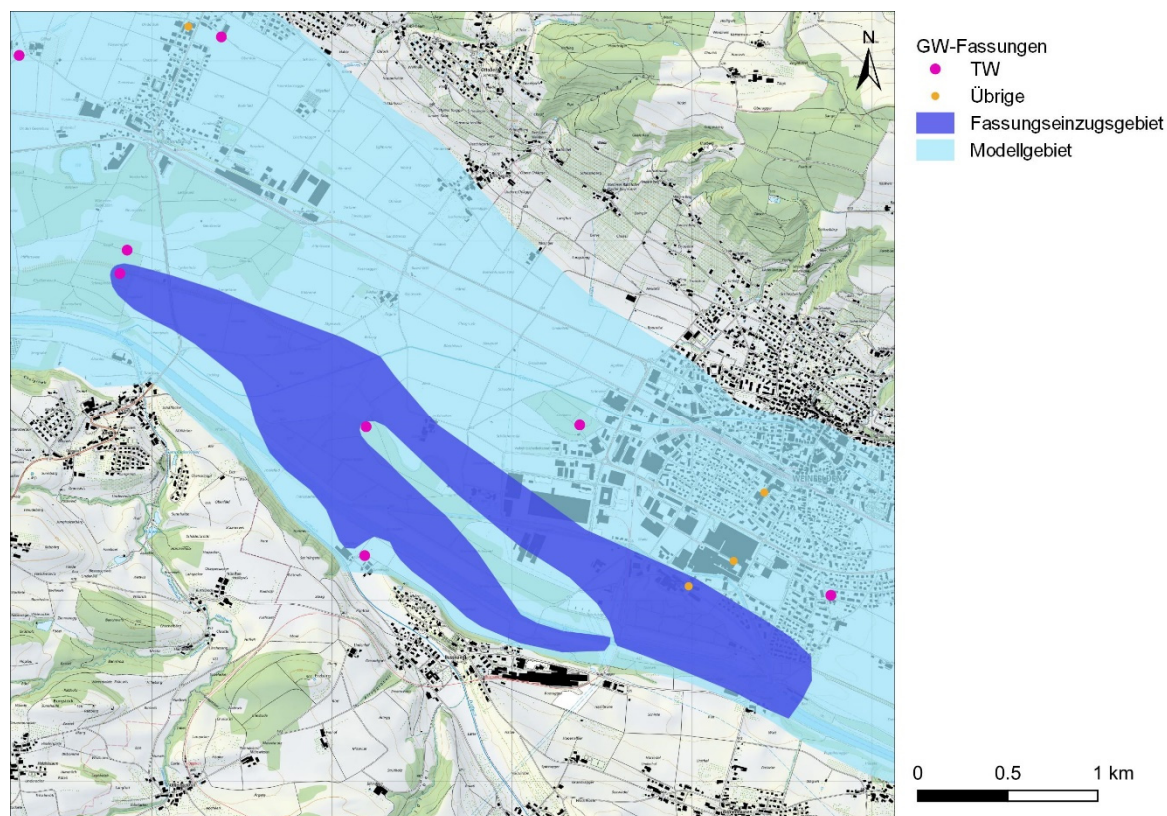


Abbildung 8: Fassungseinzugsgebiet der Fassung Gugel Br2.



Abbildung 9: Einzugsgebiete der Fassungen zwischen Neunforn und Felben-Wellhausen.

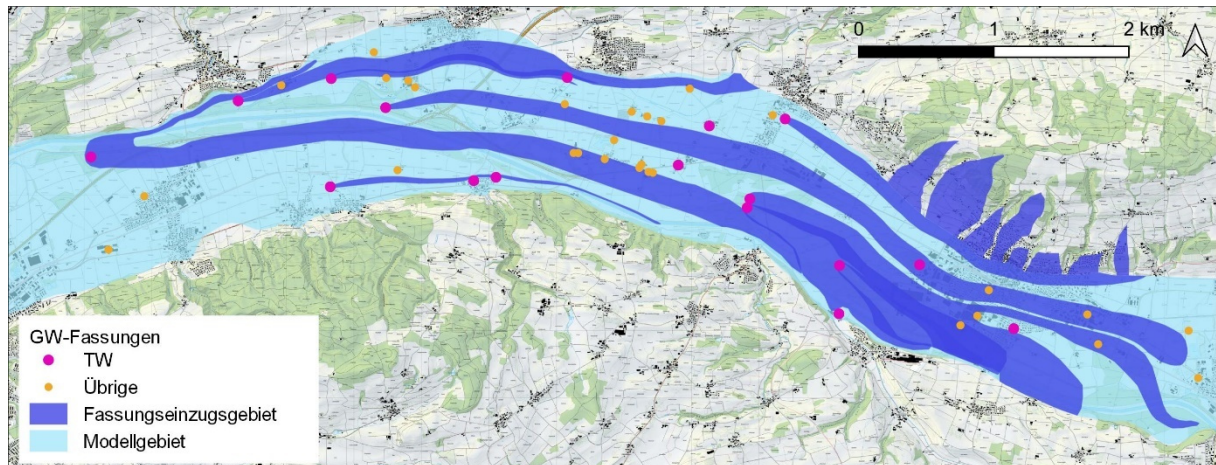


Abbildung 10: Einzugsgebiete der Fassungen zwischen Felben-Wellhausen und Weinfelden.

5.3 Abschätzung der Zuströmbereiche

Für die Festlegung des approximativen Zuströmbereiches wurde vom BAFU (Plattform Grundwasserschutz) vorgegeben, dass auf der Fläche des Zuströmbereiches 90% des geförderten Wassers neu gebildet wird. Dies entspricht der heute gültigen Anleitung des BAFU in deutscher Sprache [5].

Mit dem stationären Grundwassermodell wurde für jede einzelnen Fassung über deren ausgeschiedenen Einzugsgebiete die Wasserbilanz berechnet. Für die Bestimmung der Zuströmbereiche wurden die Fassungseinzugsgebiete so gekürzt, dass auf der verbleibenden Fläche die aufsummierte Grundwasserneubildung aus Niederschlag, Gewässern und Hangzufluss 90% des in der Fassung geförderten Grundwassers entspricht. Mit der hier angewandten Methode dürfen sich die Zuströmbereiche der verschiedenen Fassungen nicht überschneiden.

Abbildung 11 zeigt den approximativen Zuströmbereich der Fassung Gugel2. Die Zuströmbereiche der restlichen Fassungen sind in den Abbildung 12 und Abbildung 13 dargestellt.

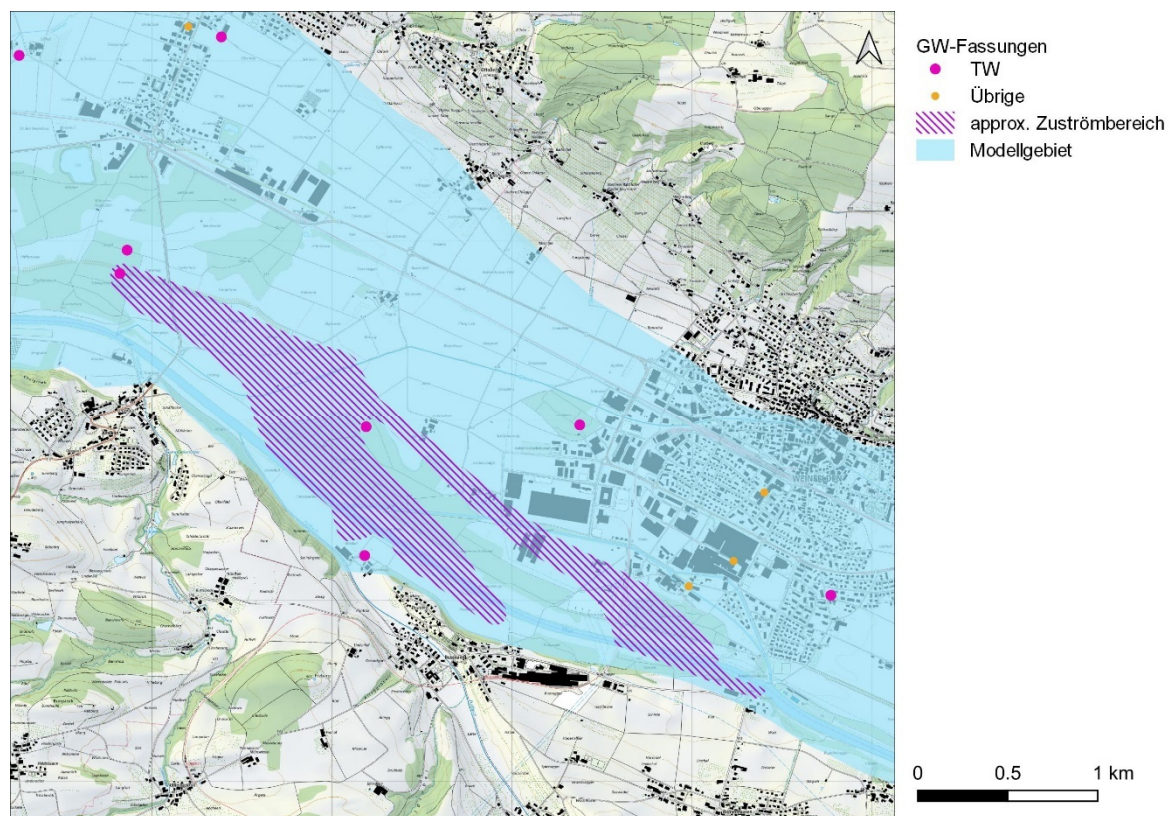


Abbildung 11: Approximativer Zuströmbereich der Fassung Gugel2.

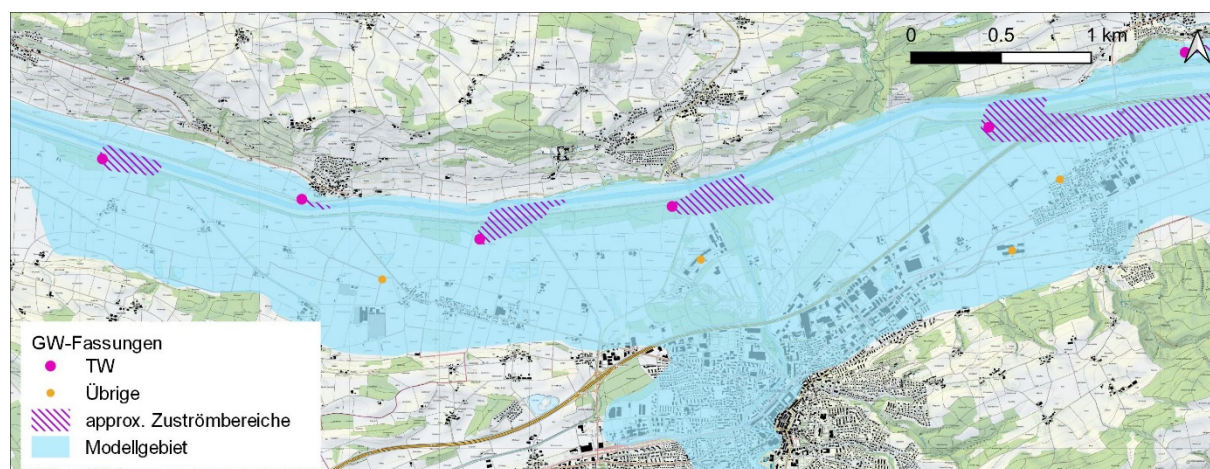


Abbildung 12: Approximative Zuströmbereiche der Fassungen zwischen Neunforn und Felben-Wellhausen.

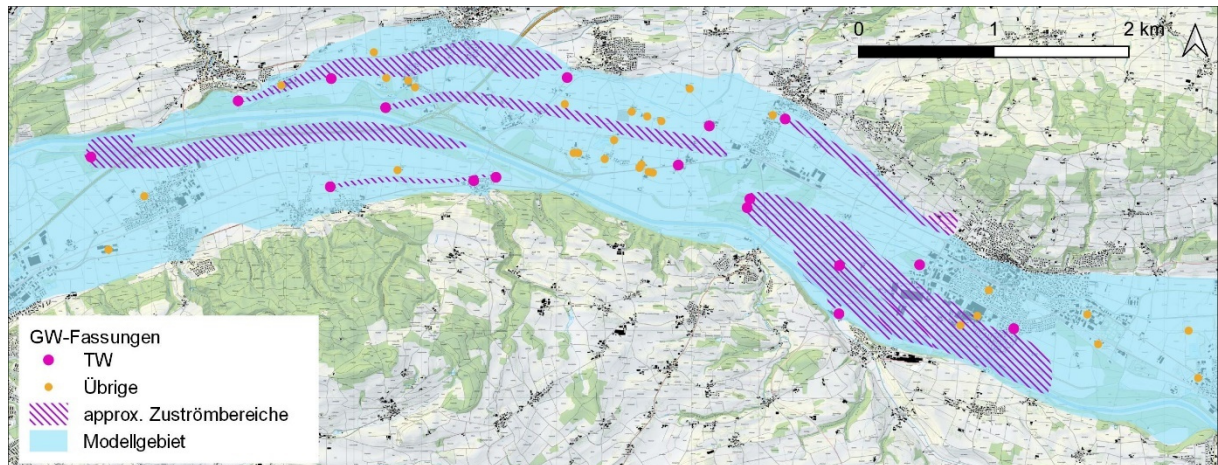


Abbildung 13: Approximative Zuströmbereiche der Fassungen zwischen Felben-Wellhausen und Weinfeldern.

6 Literatur

- [1] Weber A. (1924): Der Grundwasserstrom im Thurtal, *Mitteilungen der Thurgauischen Naturforschenden Gesellschaft, Band 25*
- [2] Departement für Bau und Umwelt Kanton Thurgau (2008): Grundwassermodell Thurtal, *Schlussbericht*
- [3] Cordes C. & Kinzelbach W. (1992): Continuous Groundwater Velocity Fields and Path Lines in Linear, Bilinear, and Trilinear Finite Elements - *Water Resources Research, Vol. 28, No 11.*
- [4] Gmünder C. (2008): Modellgestützte Ermittlung der Einzugsbereiche von Grundwasserfassungen, *Mitteilungen der Thurgauischen Naturforschenden Gesellschaft, Band 63*
- [5] BAFU (2005): Praxishilfe zur Bemessung des Zuströmbereichs Z_u .
- [6] Bussard, T., Tacher L., Parriaux A., Bayard D., Maitre V. (2004): Dimensionnement des aires d'alimentation Z_u , Document de base. *Vollzug Umwelt Nr. 183, BUWAL*
- [7] Cherry, J. (2023): In My Experience: The Lessons from Dispersion – Don't Believe Everything You Read
- [8] Kinzelbach W. (1992): Numerische Methoden zur Modellierung des Transports von Schadstoffen im Grundwasser - R. Oldenbourg Verlag München Wien, 2. Auflage
- [9] UFFINK G.J. M. (1990): Analysis of Dispersion by the Random Walk Method - *Proefschrift, Technische Universiteit Delft*
- [10] Frind E.O., Muhammad D.S., Molson J.W. (2002): Delineation of Three-Dimensional Well Capture Zones for Complex Multi-Aquifer Systems. *Final version, submitted to Groundwater*
- [11] Amaral H., Berg M., Bolotin J., von Gunten U., Hoehn E., Hofer M., Kipfer R. Zobrist J. (2005): Beurteilung der Herkunft des Grundwassers in der Trinkwasserfassung Widen, Frauenfeld. *Schlussbericht zuhanden des Amtes für Umwelt, Kanton Thurgau*