

MALL Umweltpreis 2023

Klimaanpassung und Klimaschutz mit der Energiezisterne. Das Boden-/Wassermodell als effiziente Komponente für Planung und Betrieb.



Zuwendungsnummer

FKZ_16KN085525

Donaueschingen, 14.06.2023
Andreas Lebmeier

Wie es dazu kam

Andreas Lebmeier

M.Eng. Project Engineer

a.lebmeier@consolinno.de

Tel.: +49 (0) 941 20300 423

Consolinno Energy GmbH

www.consolinno.de

Franz-Mayer-Straße 1

93053 Regensburg



Abb. 1 Andreas Lebmeier

Wie es dazu kam

Studium:



Abb. 2 @mcc-berlin

Umweltschutz (M.Eng.)

www.hfwu.de/studium/studienangebot/umweltschutz

Fachrichtung der Masterarbeit:

Siedlungswasserwirtschaft

Vielen Dank an Prof. Dr. Peter Baumann



Abb. 1 Andreas Lebmeier

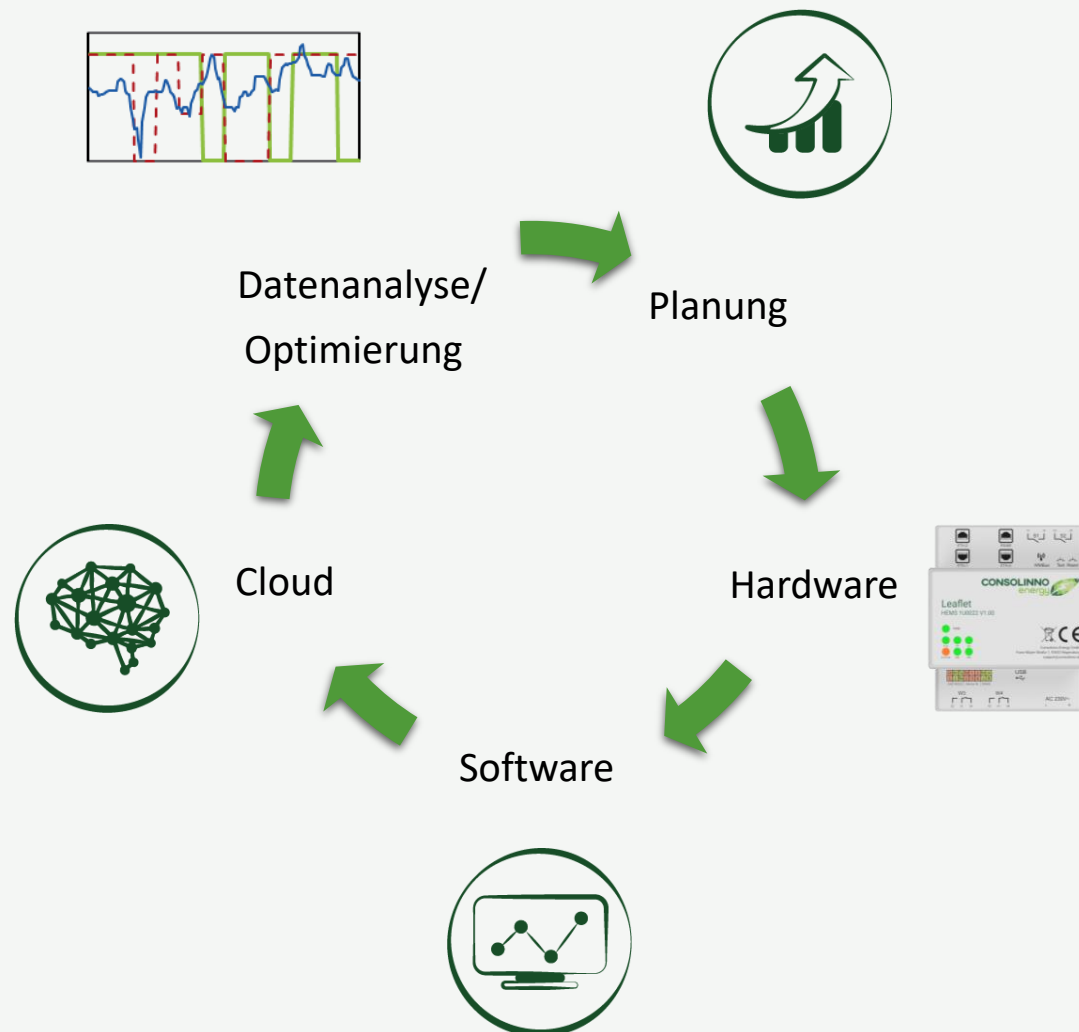
Consolinno Energy GmbH

Gegründet 2017 von Klaus Nagl

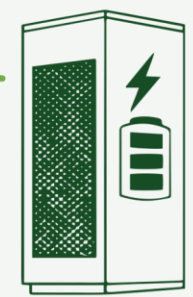
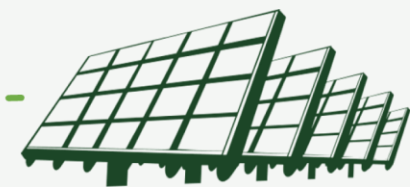
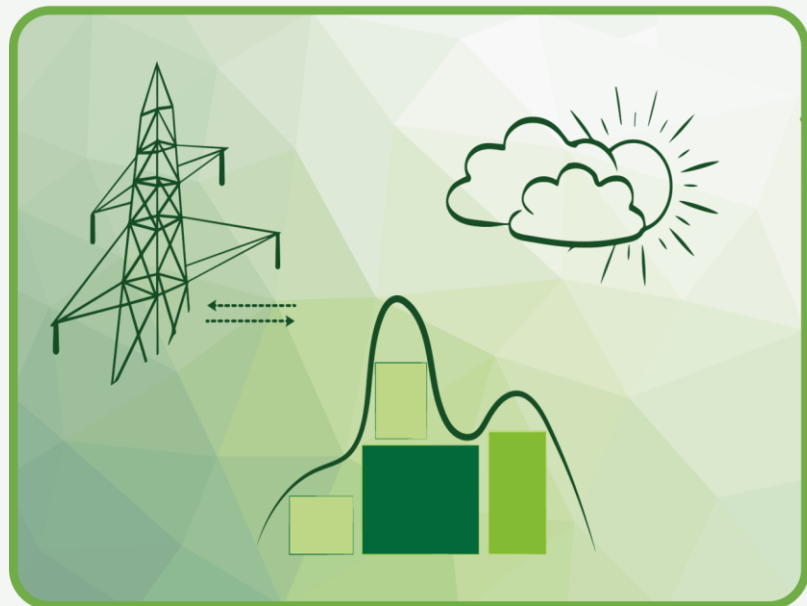
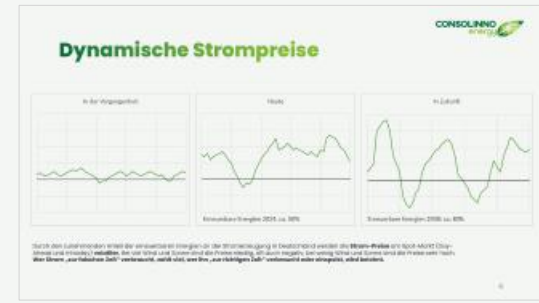
~ 80 Mitarbeiter:innen

Experten für:

- Kostengünstige Energie- & CO₂-Reduktion in allen Sektoren
- Beratung & Konzeptionierung für innovative Energieversorgungen u.a.
 - Wärmeversorgung 4.0 (BEW)
 - Prognosebasiertes Fahrplanmanagement
 - Last- und Eigenstromoptimierung
- Digitalisierung inkl. eigener Hardware
- Intelligente KI-gesteuerte Energiemanagementsysteme

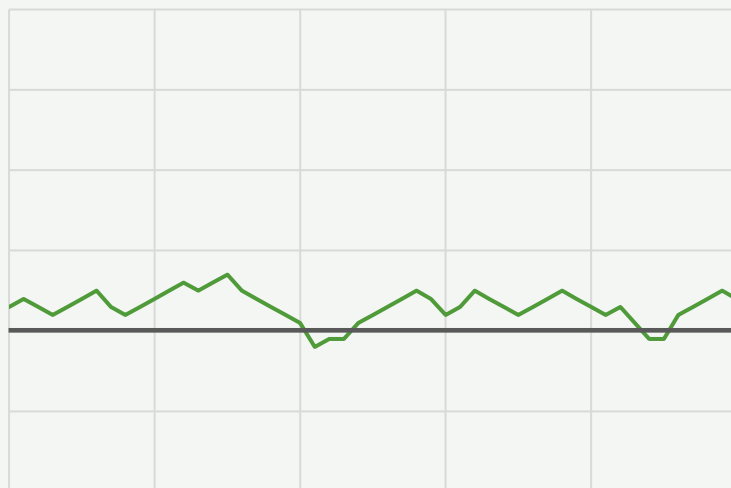


Energy Projects

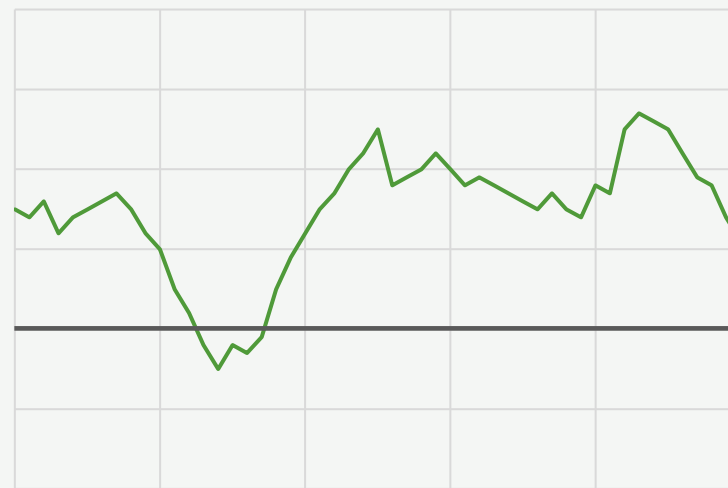


Dynamische Strompreise

In der Vergangenheit

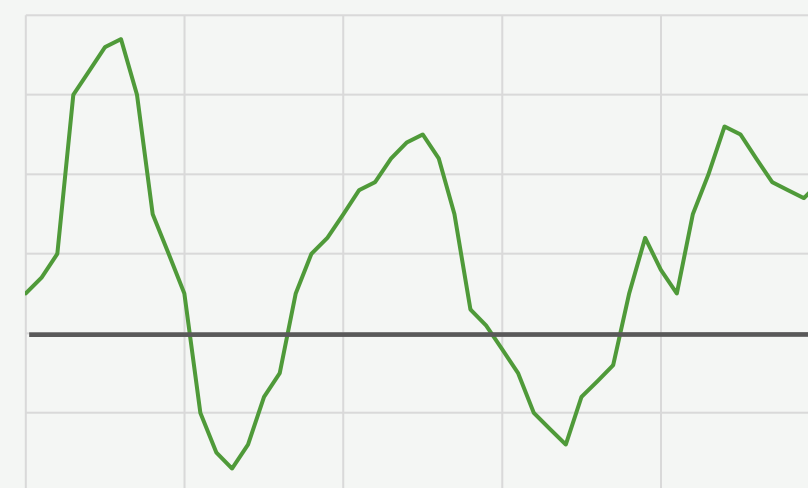


Heute



Erneuerbare Energien 2024: ca. 50%

In Zukunft



Erneuerbare Energien 2030: ca. 80%

Durch den zunehmenden Anteil der erneuerbaren Energien an der Stromerzeugung in Deutschland werden die **Strom-Preise** am Spot-Markt (Day-Ahead und Intraday) **volatiler**. Bei viel Wind und Sonne sind die Preise niedrig, oft auch negativ, bei wenig Wind und Sonne sind die Preise sehr hoch. **Wer Strom „zur falschen Zeit“ verbraucht, zahlt viel, wer ihn „zur richtigen Zeit“ verbraucht oder einspeist, wird belohnt.**

Energiezisterne

Wieso das ganze?



Abb. 3 © [umweltbundesamt](#)



Abb. 4 © [Deutschlandfunk](#)



Abb. 5 © [BR](#)

Energiezisterne

Lösungsansatz

Kombination bekannter Techniken:

- Retentionsraum schaffen
- Wasser speichern und nutzen
- lokale Versickerung
- Wärmepumpentechnologie

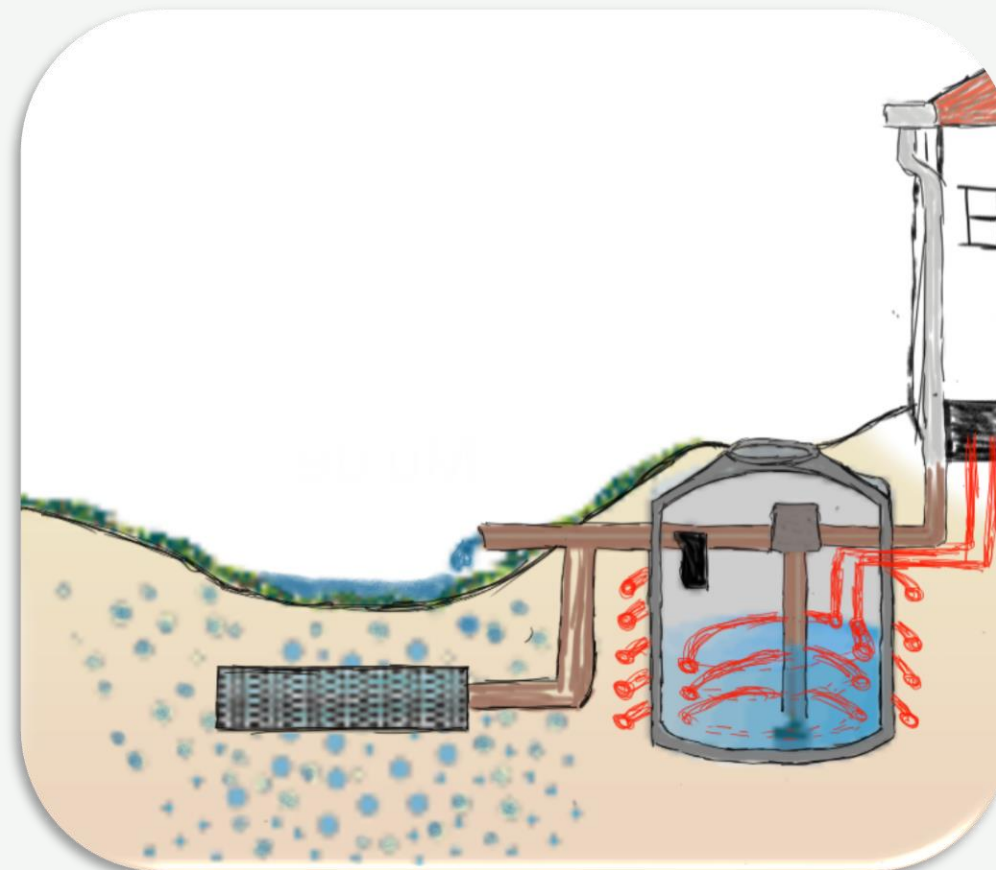


Abb. 6 Konzeptskizze

Energiezisterne

Forschungsfragen

1. Wie lässt sich die Wasserbilanz durch blau-grüne Infrastruktur verändern?
2. Wie verhalten sich die Wärmeströme im Erdreich innerhalb der Systemgrenzen?
3. Wie wirkt sich eine gezielte Versickerung auf die thermische Leitfähigkeit des Bodens aus?

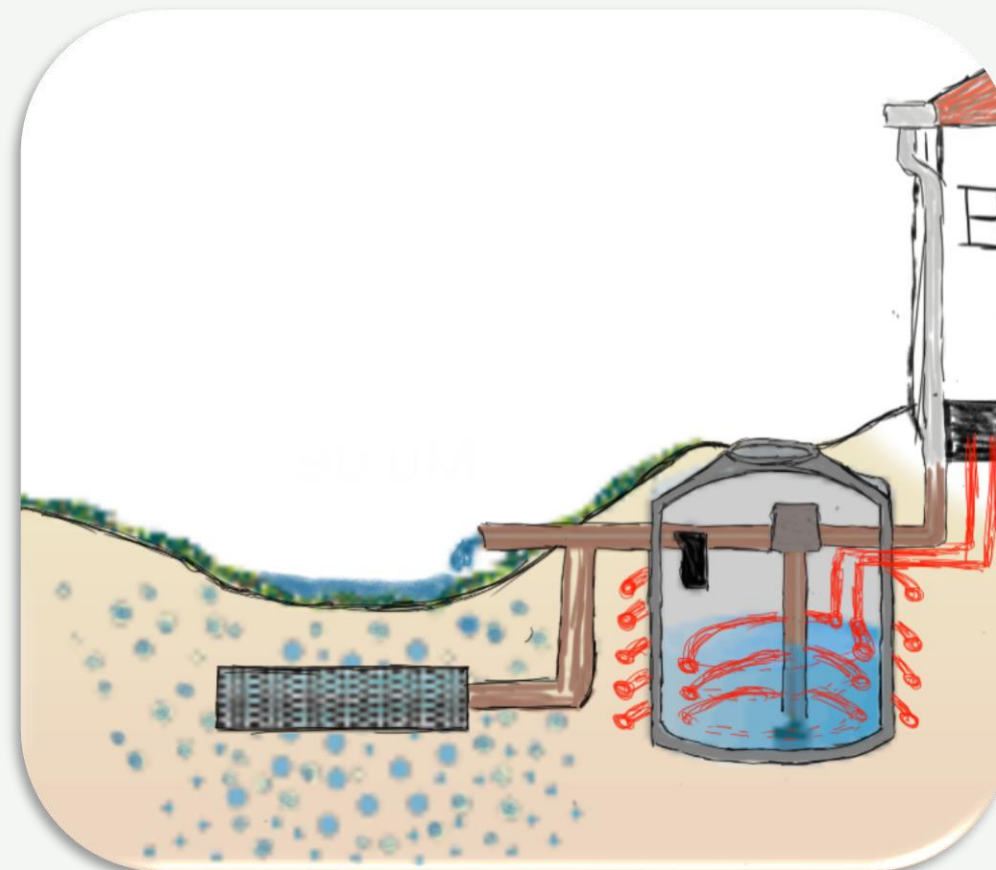


Abb. 6 Konzeptskizze

Boden-/Wassermmodell

Modellieren mit OpenModelica

$$\dot{Q} = (T_1 - T_2) \cdot \frac{1}{\lambda} > 0$$

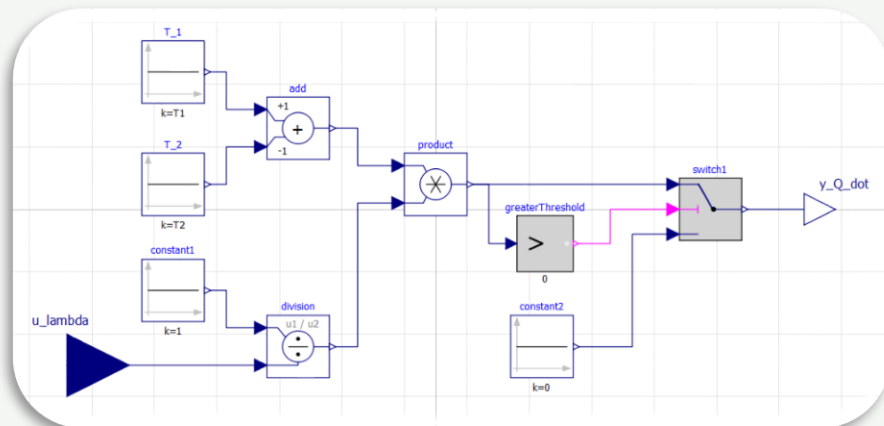


Abb. 8 Beispiel-Model

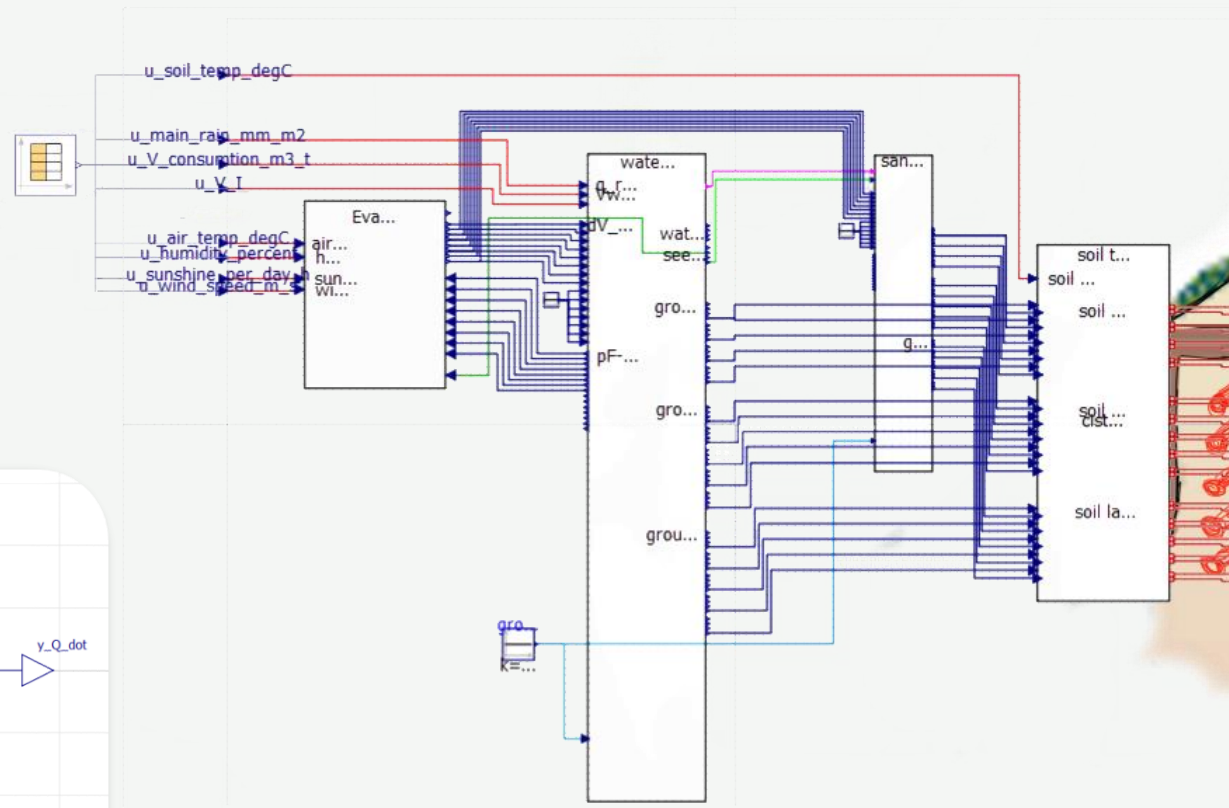
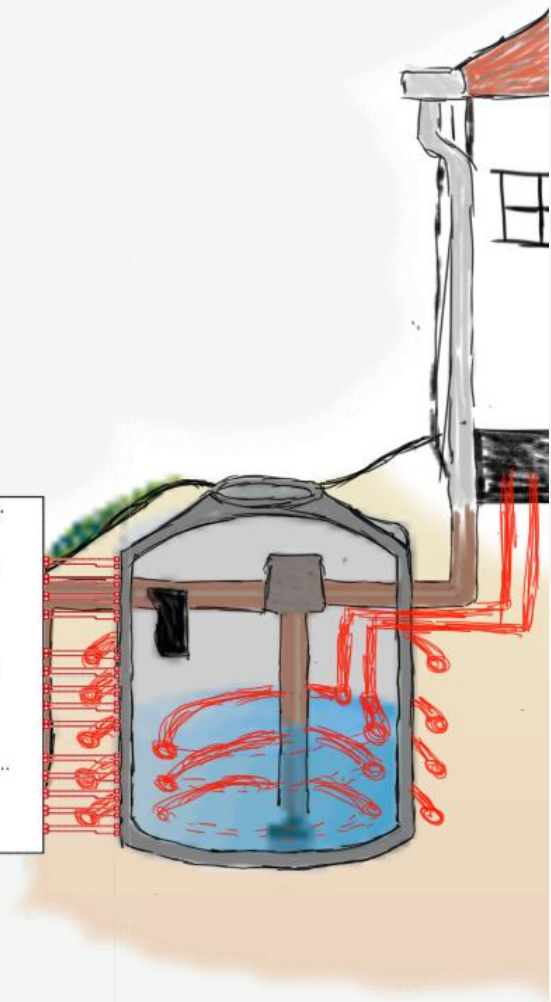
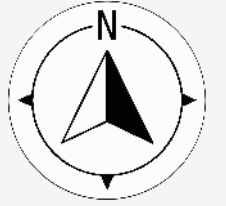


Abb. 7 Boden-Wasser-Model



Boden-/Wassermodell



Quartier
in Regensburg

Grundfläche: 3939 m²

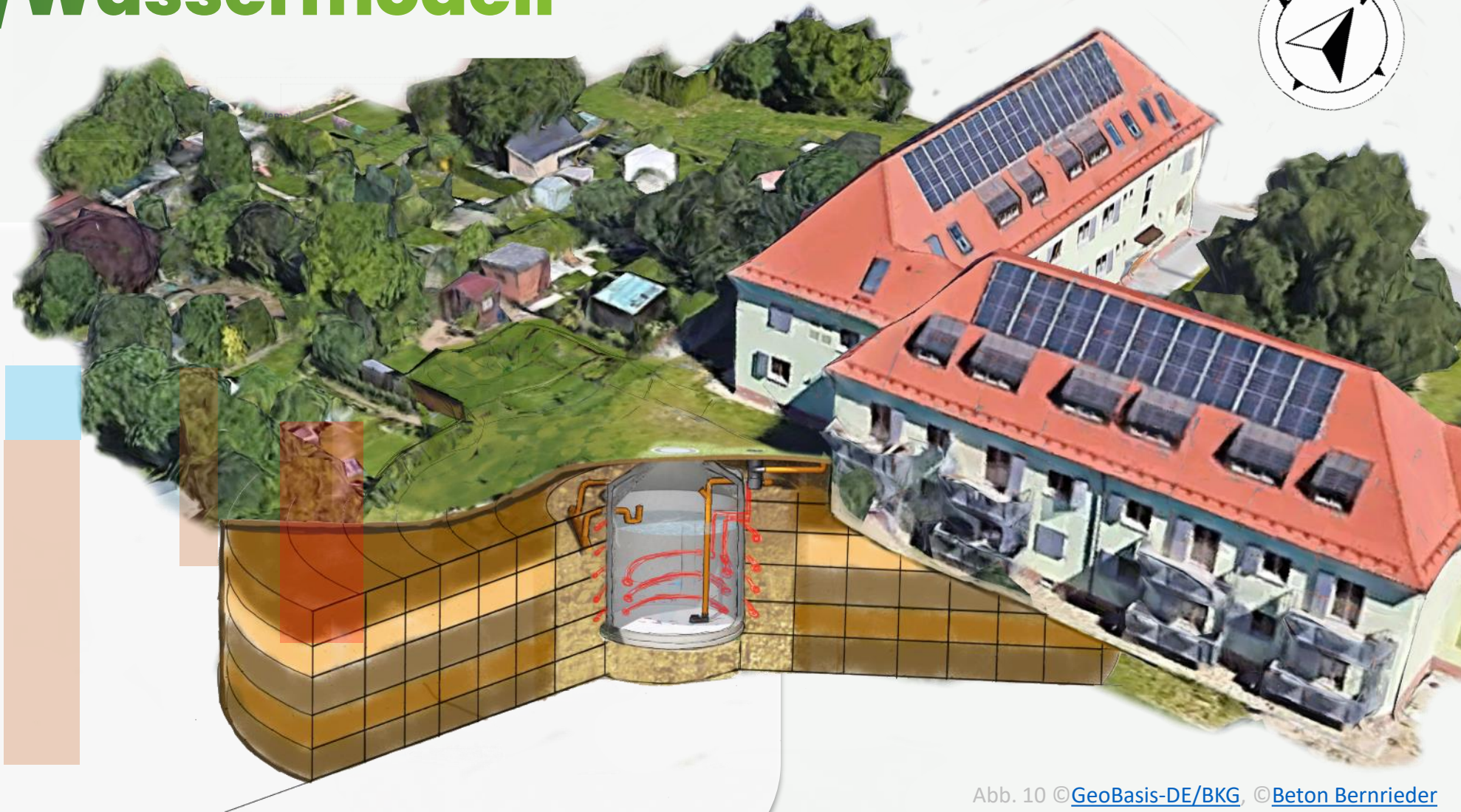
Dachfläche: 881 m²

Geländeneigung: 1°

Bewohner: 25

Abb. 9 © [GeoBasis-DE/BKG](#)

Boden-/Wassermmodell



- Eingangswerte
- Evapotranspiration
- Wasserbilanz
- Boden-Leitfähigkeit
- Wärmeströme

Abb. 10 ©GeoBasis-DE/BKG, ©Beton Bernieder

Boden-/Wassermmodell

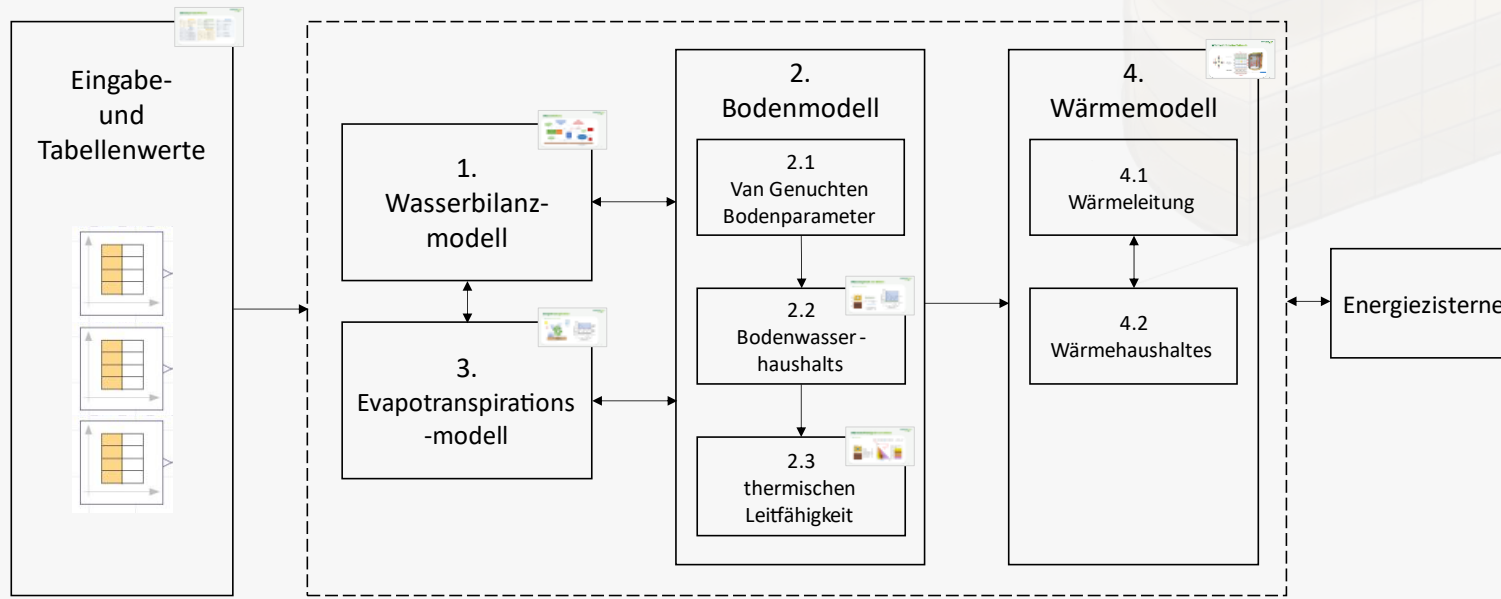
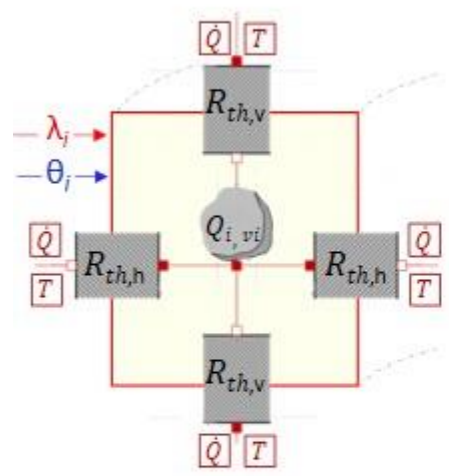


Abb. 10 © [GeoBasis-DE/BKG](#), © [Beton Bernrieder](#)

Wärmeströme im Erdreich



Referenzschichten

Bereich der geothermischen Nutzung

Tiefenschichten

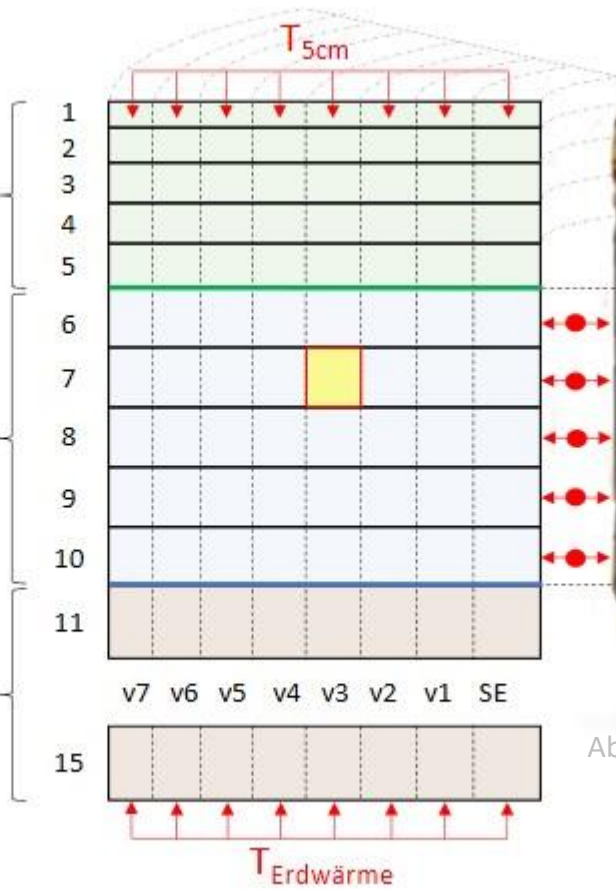


Abb. 11 Energiezisterne-Skizze, © [Beton Bernrieder](#)

Wärmeleitfähigkeit von Böden

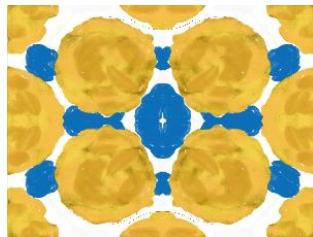
nach Kersten

$$\lambda_{sandig} = 0,1442 \cdot (0,7 \cdot \log w + 0,4) \cdot 10^{0,6243 \cdot TRD}$$

$$\lambda_{tonig} = 0,1442 \cdot (0,9 \cdot \log w - 0,2) \cdot 10^{0,6243 \cdot TRD}$$

w : Wassergehalt [Gew.-%]
TRD : Trockenrohdichte [g/cm³]

Sandboden



Tonboden

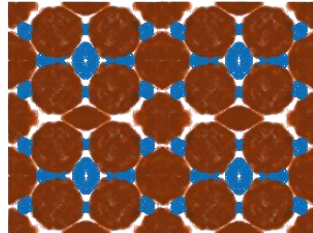


Abb. 12 Bodenmatrix

- Korngröße sinkt
- Porengröße sinkt
- Wasserdurchlässigkeit sinkt
- Wasserhaltevermögen steigt
- Pflanzenverfügbarkeit sinkt
- Durchwurzelbarkeit sinkt

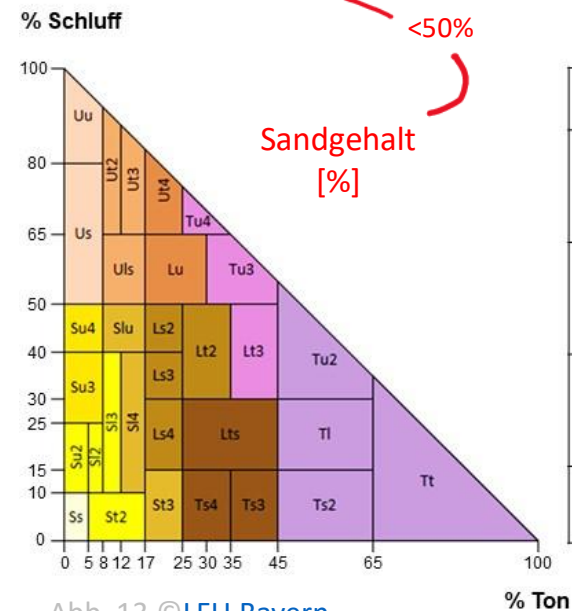


Abb. 13 © LFU Bayern

Bodenarten-Hauptgruppen	Bodenarten-Gruppen	Bodenarten
Sande 2 - 0,063 mm	Reinsande	Ss
	Lehmsande	St2, Su2, Sl2, Sl3
	Schluffsande	Su3, Su4
Lehme 2 - 63 µm	Sandlehme	Slu, Sl4, St3
	Normallehme	Lt2, Ls2, Ls3, Ls4
	Tonlehme	Lts, Ts3, Ts4
Schluffe	Sandschluffe	Us, Uu
	Lehmschluffe	Ut2, Ut3, Uls
	Tonschluffe	Ut4, Lu
Tone <2 µm	Schlufftone	Tu3, Tu4, Lt3
	Lehmtone	Tt, Tu2, Tt, Ts2

Wassergehalt von Böden

nach van-Genuchten

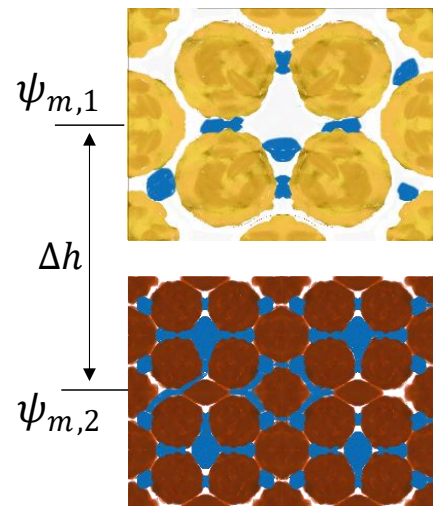


Abb. 12 Bodenmatrix

Wasserbewegung

Darcy'sches Gesetz

$$Q_{H_2O} = k_u(\psi_m) \cdot \left(\frac{\Delta\psi_m}{\Delta h} + 1 \right)$$

Hydraulisches Potential

Q_{H_2O} : Volumenstrom des Wassers [m³/s]
 k_u : hydr. Durchlässigkeitsbeiwert [m/s]
 ψ_m : Matrixpotential [cmWS]
 h : mittl. Bodenschichttiefe [cm]

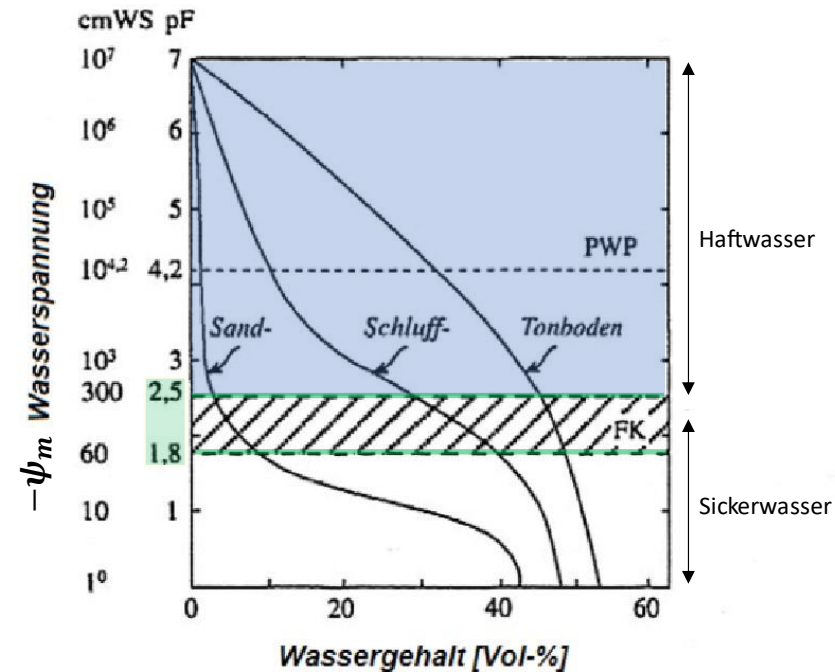


Abb. 14 ©Scheffer u. Schachschabel 2006

Evapotranspiration

nach Penman-Monteith

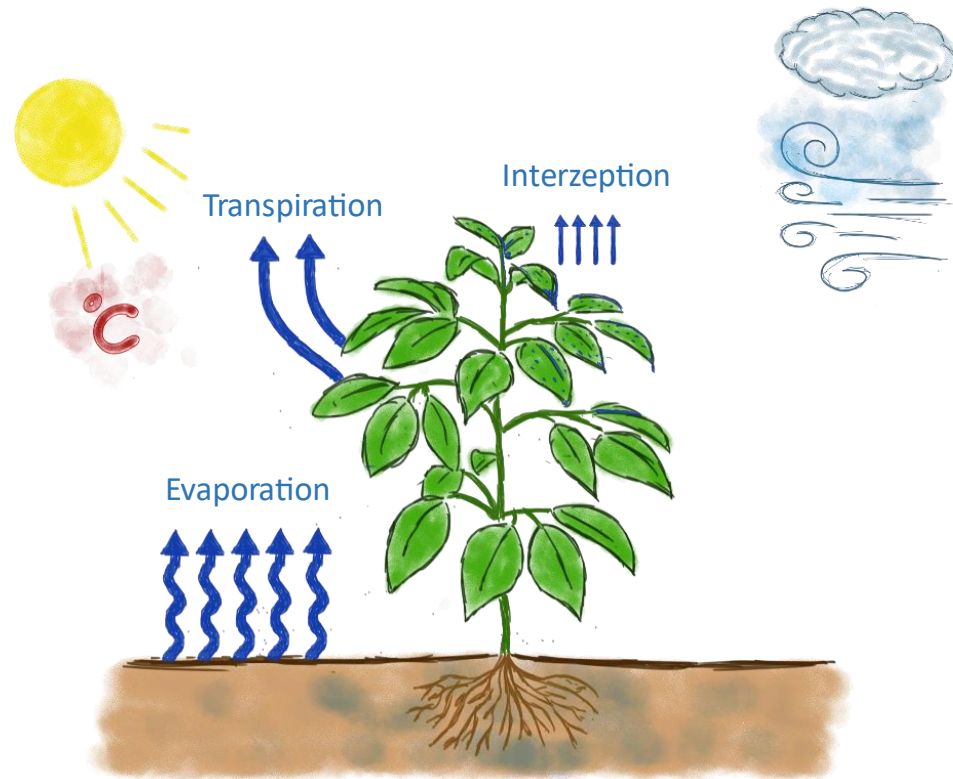


Abb. 15 Evapotranspiration

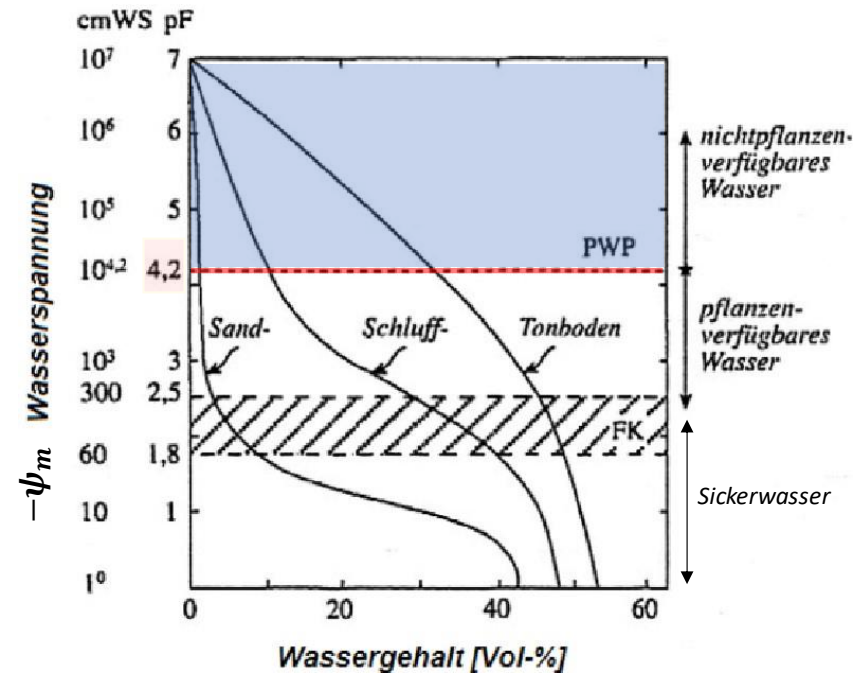
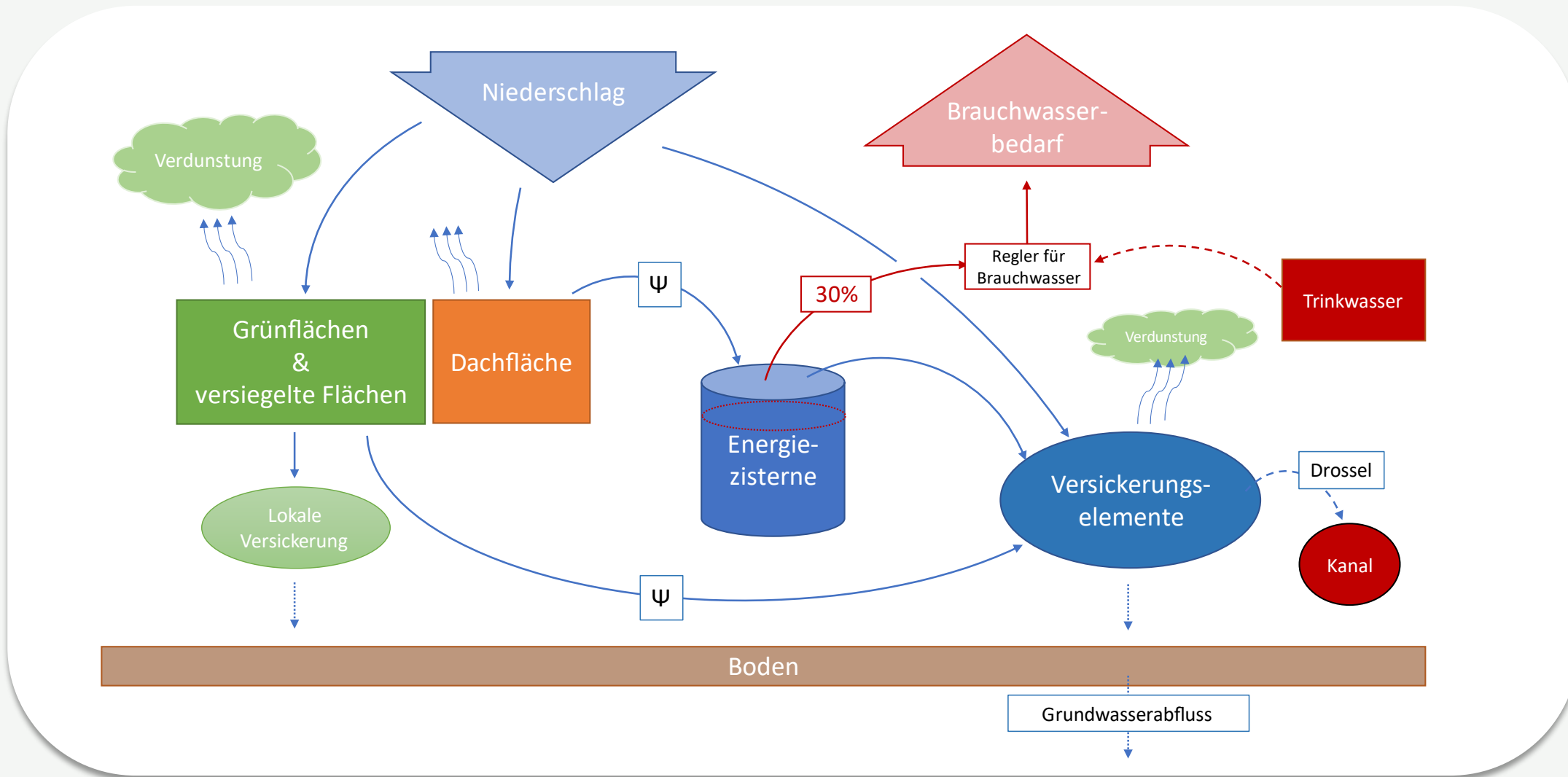


Abb. 13 ©Scheffer u. Schachschabel 2006

Wasserbilanz



Benutzeroberfläche

Eingangsdaten

1.1.Input: Data

day_ofset	<input type="text" value="16"/>	d	vergangene Tage seit 1. Januar (Tabellenwerte)
degree_of_latitude	<input type="text" value="49"/>		Breitengrad [°]
t_stepT_rain	<input type="text" value="86400"/>	s	Niederschlag: Zeitschritte der Tabellenwerte
t_stepT_consumption	<input type="text" value="86400"/>	s	Wasser-Nutzung: Zeitschritte der Tabellenwerte
pF_FK	<input type="text" value="2.5"/>		pF-Wert bei Feldkapazität
pF_WP	<input type="text" value="4.2"/>		pF-Wert bei Welkepunkt
s_GLv	<input type="text" value="0.01"/>	m	vertikale Schichtdicke Layer 1

Zisterne

1.2.Input: cistern dimensions

d_CWo	<input type="text" value="2.6"/>	m	Außendurchmesser Zisterne
d_CWi	<input type="text" value="2.5"/>	m	Innendurchmesser Zisterne
roh_CW	<input type="text" value="2.4"/>	<input type="text" value="g/cm3"/>	Dichte Zylinderwand
cp_CW	<input type="text" value="1000"/>	J/(kg.K)	spez. Wärmekapazität Zisternenwand
lambda_CW	<input type="text" value="1.35"/>	W/(m.K)	Wärmeleitfähigkeit Zisternenwand
s_SL	<input type="text" value="0.2"/>	m	Stärke der Sandschicht, Einbettung Zisterne
w_clay_SL	<input type="text" value="24"/>	Gew.-%	Sandeinbettung: Tongehalt
w_sand_SL	<input type="text" value="74.5"/>	Gew.-%	Sandeinbettung: Sandgehalt, Kies, Steine
w_Corg_SL	<input type="text" value="1.5"/>	Gew.-%	Sandeinbettung: organischer C-Gehalt
k_f_SL	<input type="text" value="0.000005"/>	m/s	Sandeinbettung: Durchlässigkeitsbeiwert
roh_dry_SL	<input type="text" value="1.6"/>	<input type="text" value="g/cm3"/>	Sandeinbettung: Trockenrohdichte
cp_SL	<input type="text" value="1000"/>	J/(kg.K)	Sandeinbettung: spez. Wärmekapazität

Evapotranspiration

2.Evapotranspiration

albedo_input	<input type="text" value="2"/>		Oberflächenalbedo: Wasser=1, Rasen=2, Grünland=3, Felder unbestellt=4, Buschland=5, Bäume=6, Sandboden=7, Asphalt=8
h_wind	<input type="text" value="10"/>	m	Höhe der Windmessung
h_vegetation	<input type="text" value="0.5"/>	m	Höhe der Vegetation
a_terrain	<input type="text" value="0.22"/>	m	Geländetyp in 3 km Umkreis (siehe DVWA238 Tafel 9.7): geringes Windhindernis=0.15, niedriges Windhindernisse=0.18, großes Windhindernis=0.22
rcp_min	<input type="text" value="50"/>		Minimaler Stomatawiderstand: Grünlands 30 bis 90 [s/m]
LAI	<input type="text" value="1"/>		Blattflächenindex: Blattfläche pro Bodenquadratmeter

Bodenschichten

4.soil_GL1

h_ET_Layer6	<input type="text" value="0"/>	m	Wurzeltiefe im betrachteten Groundlayer
h_GL_1	<input type="text" value="0.4"/>	m	Schichthöhe der betrachteten Bodenschicht
w_clay_GL1	<input type="text" value="10"/>	Gew.-%	Tongehalt (<2 µm)
w_sand_GL1	<input type="text" value="55"/>	Gew.-%	Sandgehalt, Kies, Steine (50-2000 µm)
w_Corg_GL1	<input type="text" value="1.5"/>	Gew.-%	organischer C-Gehalt
k_f_GL1	<input type="text" value="0.00005"/>	m/s	Durchlässigkeitsbeiwert bei Sättigung kf
roh_dry_GL1	<input type="text" value="1.6"/>	<input type="text" value="g/cm3"/>	Trockenrohdichte GL
cp_GL1	<input type="text" value="1000"/>	J/(kg.K)	spez. Wärmekapazität der Bodenschicht

4.soil_GL2

h_ET_Layer7	<input type="text" value="0"/>	m	Wurzeltiefe im betrachteten Groundlayer
-------------	--------------------------------	---	---

Wasserbilanz

3.1.seepage

A_seepage	<input type="text" value="35"/>	m2	Versickerungsfläche der Energiezisterne
h_seepage	<input type="text" value="0.0001"/>	m	maximale Füllhöhe der Versickerungsmulde

3.2.drain

A_sealed	<input type="text" value="5"/>	m2	Versiegelte Flächen
C_sealed	<input type="text" value="1"/>		Abflussbeiwert der versiegelten Flächen
A_green	<input type="text" value="5"/>	m2	Grünflächen
C_green	<input type="text" value="0.1"/>		Abflussbeiwert der Grünflächen
A_surface1	<input type="text" value="0"/>	m2	Fläche1
C_surface1	<input type="text" value="0"/>		Abflussbeiwert der Fläche1
A_surface2	<input type="text" value="0"/>	m2	Fläche2

3.3.retention

A_roof	<input type="text" value="5"/>	m2	horizontale Dachfläche
C_roof	<input type="text" value="1"/>		Abflussbeiwert der Dachfläche
V_E_cistern	<input type="text" value="11"/>	m3	Maximales Zisternenvolumen
k_E_cistern	<input type="text" value="0.7"/>		Vorgegebener Restwasseranteil 70%
V_retention2	<input type="text" value="5"/>	m3	Zusätzliches Retentionsvolumen

Abb. 16 Benutzeroberfläche des Boden-Wasser Modells

Ergebnisse

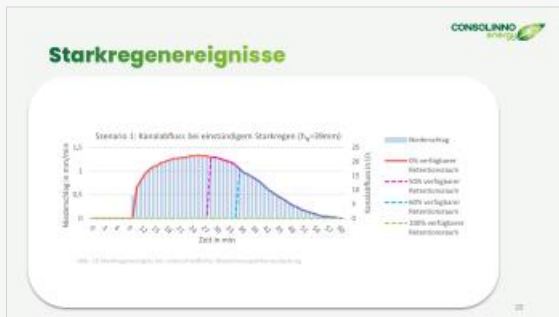
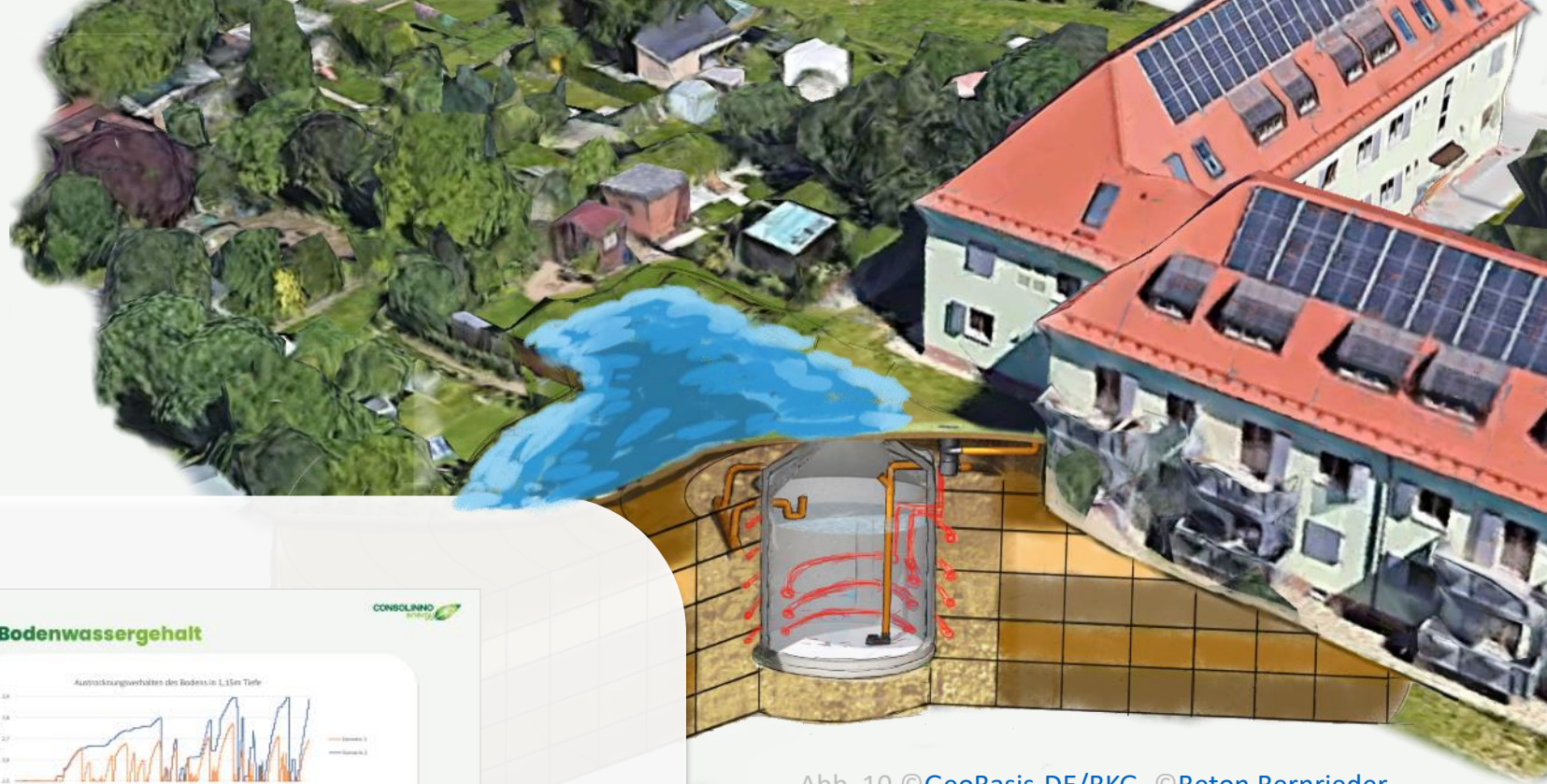
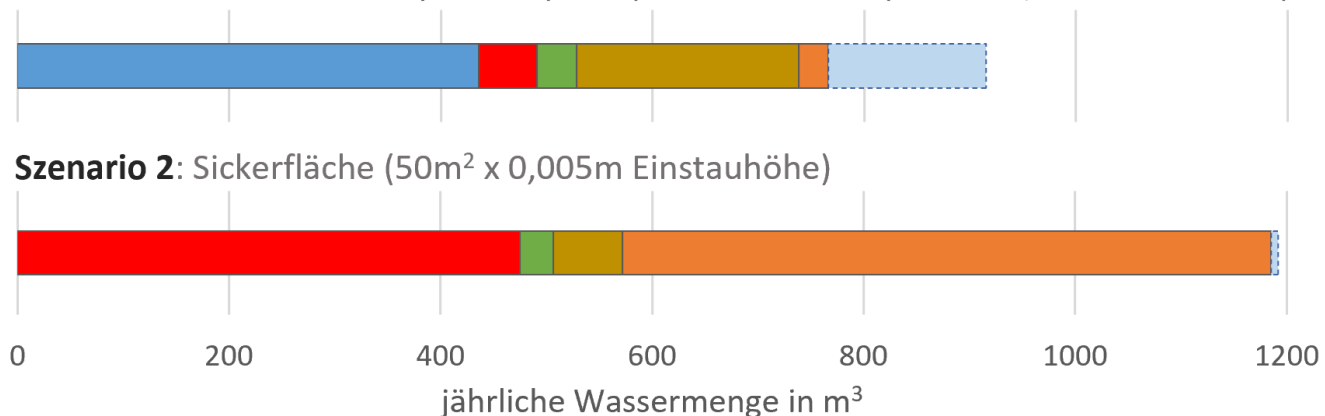


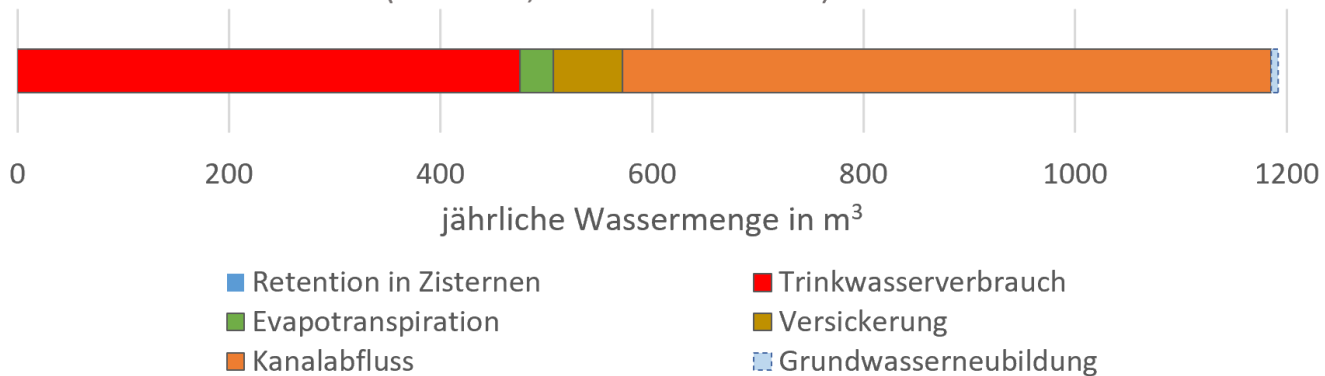
Abb. 10 © GeoBasis-DE/BKG, © Beton Bernrieder

Jahreswasserbilanz

Szenario 1: Brauchwasserspeicher (40m³) & Sickermulde (50m² x 0,3m Einstauhöhe)

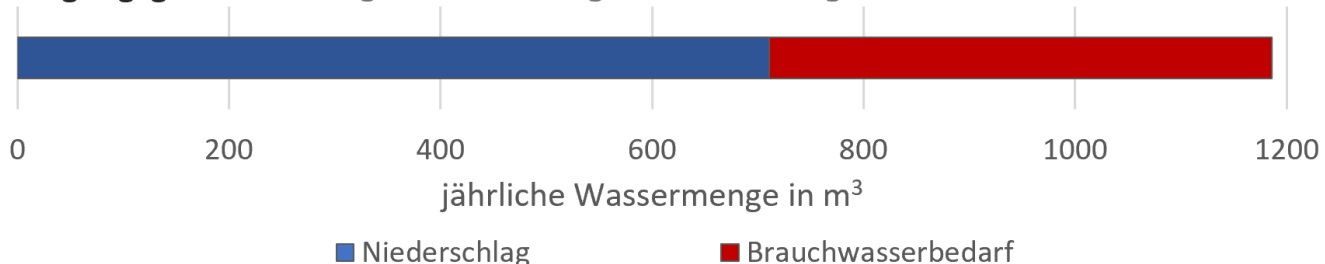


Szenario 2: Sickerfläche (50m² x 0,005m Einstauhöhe)



- Retention in Zisternen
- Evapotranspiration
- Kanalabfluss
- Trinkwasserverbrauch
- Versickerung
- Grundwasserneubildung

Eingangsgrößen: verfügbare & benötigte Wassermengen



- Niederschlag
- Brauchwasserbedarf

Trinkwassereinsparung	85 %
Kanalabflussreduktion	95 %
Versickerungssteigerung	75 %
Grundwasserneubildung	95 %
Evapotranspiration	20 %

Abb. 17 Jahreswasserbilanz für zwei Quartiers-Szenarien (gestapelte Säulen)

Starkregenereignisse

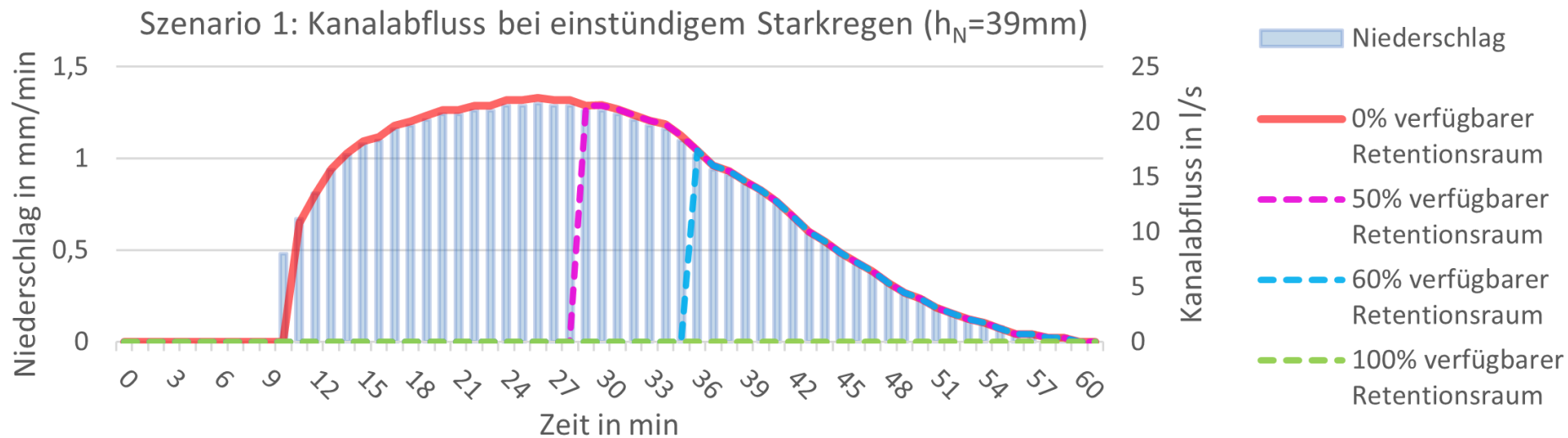


Abb. 18 Starkregenereignis bei unterschiedlicher Retentionsspeicherauslastung

Bodenwassergehalt

Austrocknungsverhalten des Bodens in 1,15m Tiefe

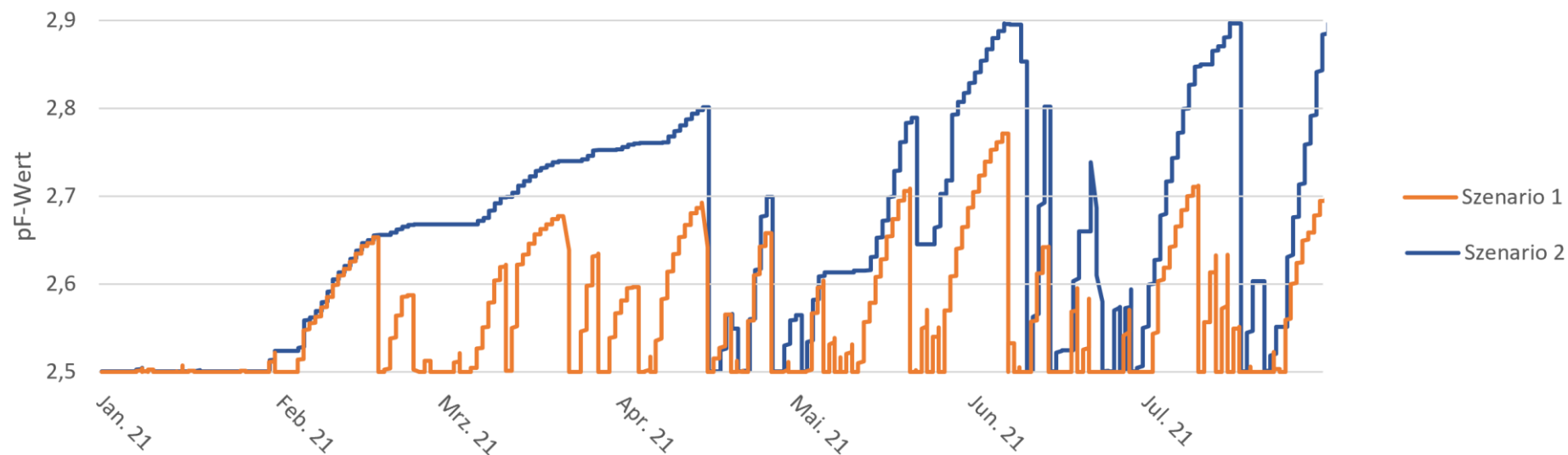
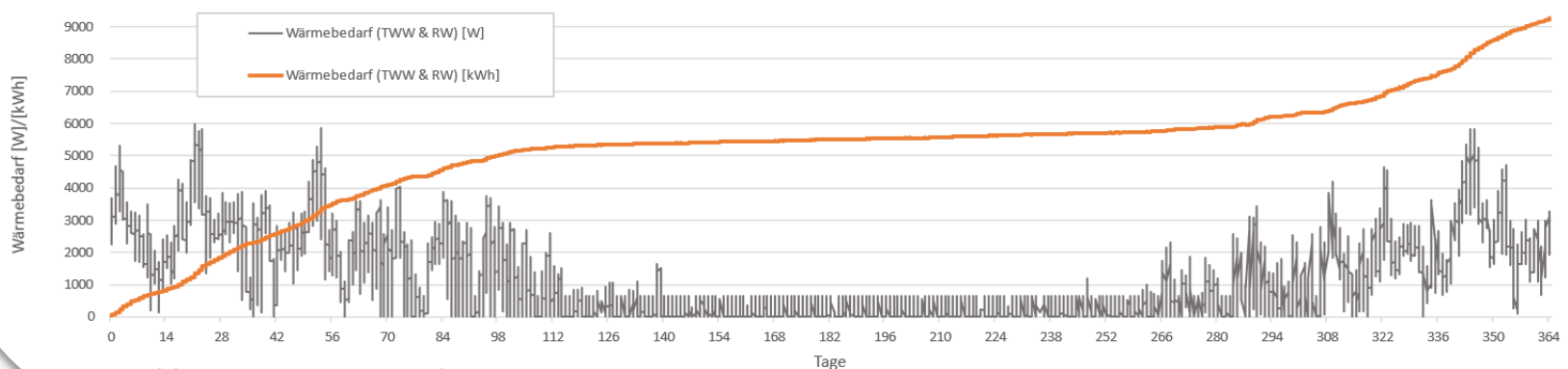
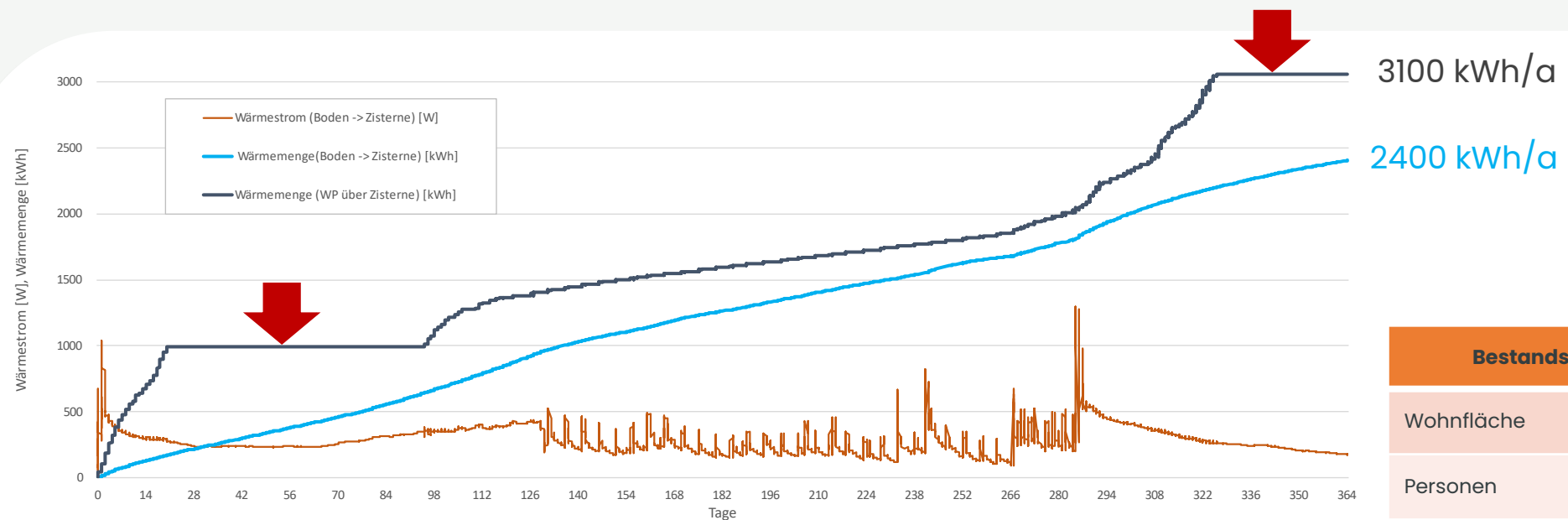


Abb. 19 Austrocknungsverhalten des Bodens zweier Quartiers-Szenarien

Bodenwassergehalt	↑ 13 %
Wärmeleitfähigkeit	↑ 10 %
nutzbare Wärmemenge	↑ 10 %

Wärmeströme



Bestandsgebäude	
Wohnfläche	150 m ²
Personen	4
spez. Wärmebedarf	60 kWh/m ² /a
Energiezisterne	11 m ³
COP	3
Simulationsjahr	2021

Abb. 20 Wärmeströme der Energiezisterne

Wärmeströme

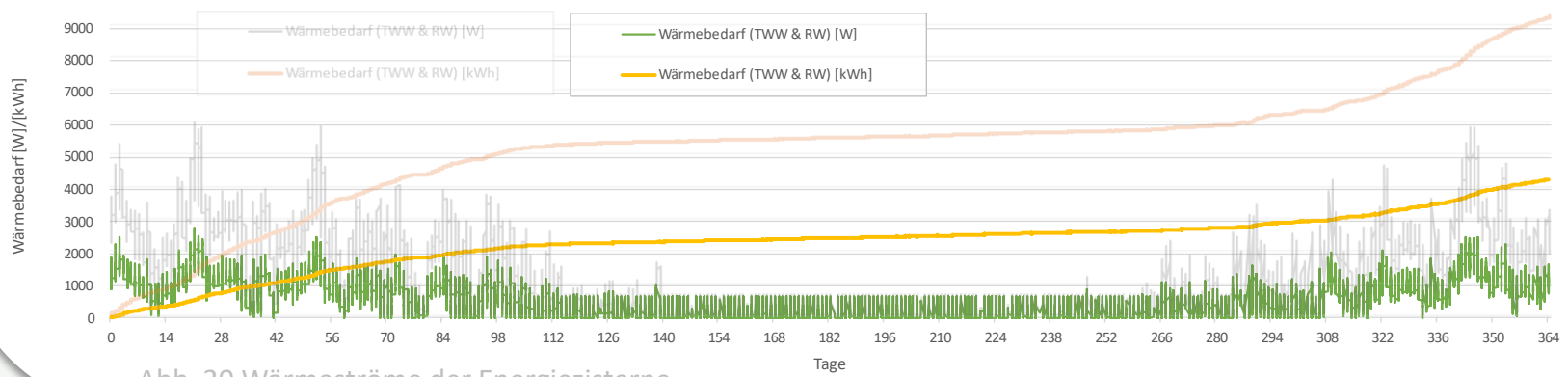
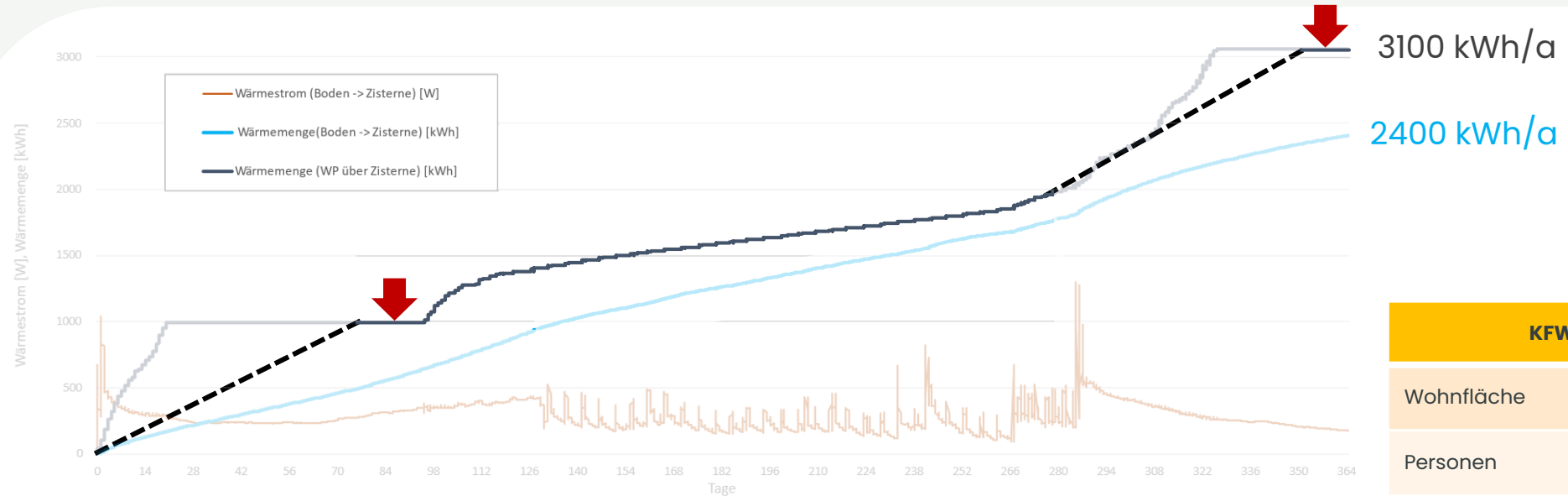


Abb. 20 Wärmeströme der Energiezisterne

KFW 40	
Wohnfläche	150 m ²
Personen	4
spez. Wärmebedarf	30 kWh/m ² /a
Energiezisterne	11 m ³
COP	3
Simulationsjahr	2021

Ausblick

- Flächendeckende Umsetzung der Energiezisterne als Teil der Stadtplanung
- Kopplung von blau-grüner Infrastruktur mit Energiesystemen
 - Kombinierte Klimaschutz- und Klimaanpassungsstrategie
 - zur Bewältigung von Starkregen
 - gegen Trockenheit und Hitze
 - für eine Reduktion der CO₂-Emissionen im Wärmesektor

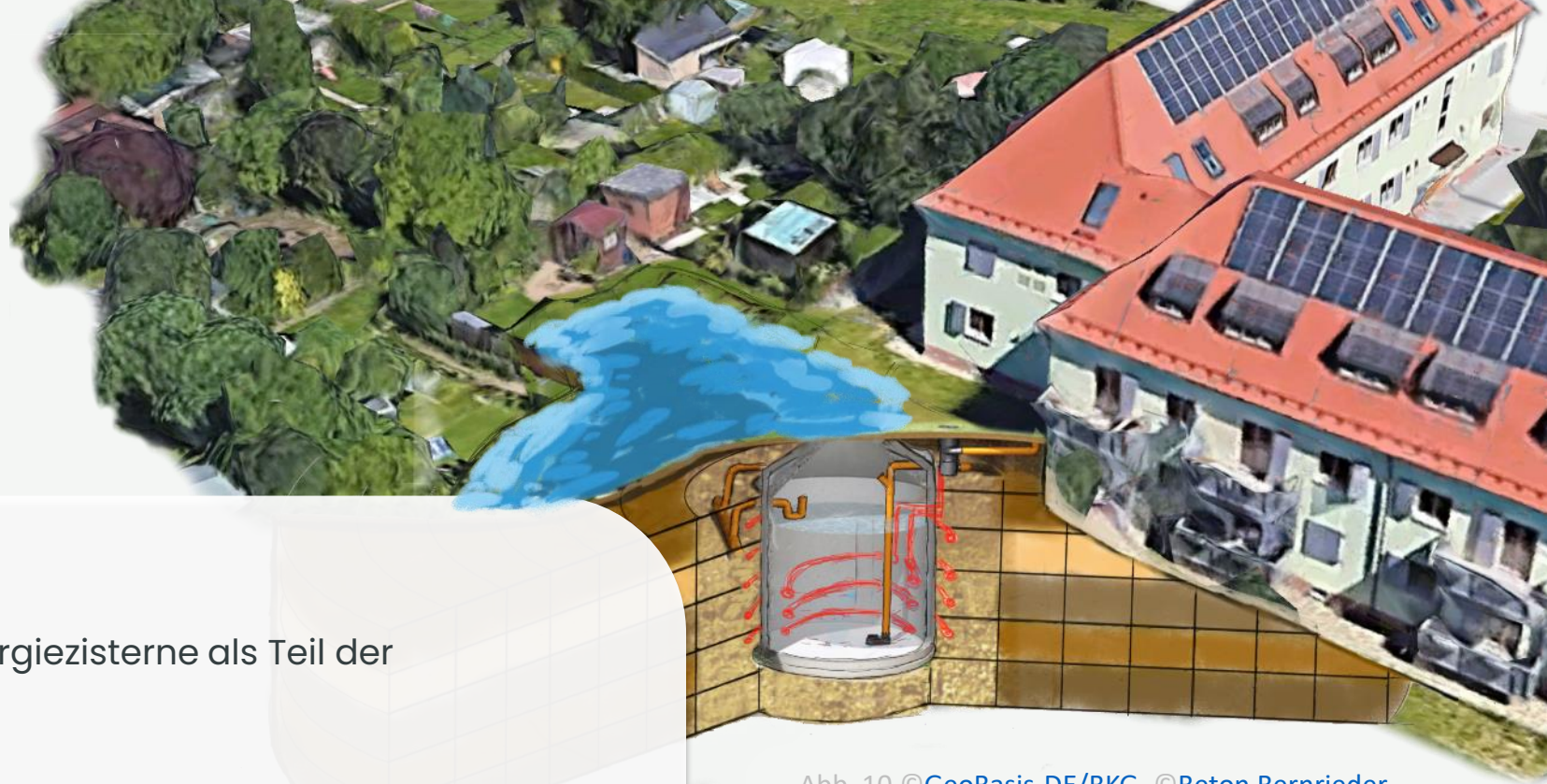


Abb. 10 © [GeoBasis-DE/BKG](#), © [Beton Bernrieder](#)

WIR MACHEN DIE ENERGIEWENDE WAHR.

Andreas Lebmeier

M.Eng. Project Engineer

a.lebmeier@consolinno.de

Tel.: +49 (0) 941 20300 423

www.consolinno.de



Literatur

Amelung, W., Blume, H.-P., Fleige, H., Horn, R., Kandeler, E., Kögel-Knabner, I., Kretzschmar, R., Stahr, K. & Wilke, B.-M. (2018). Scheffer/Schachtschabel Lehrbuch der Bodenkunde., 17. Auflage Berlin.

Baehr, H. D. & Stephan, K. (1996). Wärme- und Stoffübertragung., 2. Auflage Berlin Heidelberg.

Bug, J., Heumann, S., Müller, Dr. U. & Waldeck, A. (2020). Auswertungsmethoden im Bodenschutz: Dokumentation zur Methodenbank des Niedersächsischen Bodeninformationssystems NIBIS®. URL: https://nibis.lbeg.de/doi/DOI.aspx?doi=10.48476/geober_19_2020, 24.03.2022.

Dehner, Dr. U., Müller, Dr. U. & Schneider, Dr. J. (2014). Erstellung von Planungsgrundlagen für die Nutzung von Erdwärmekollektoren. URL: https://nibis.lbeg.de/doi/DOI.aspx?doi=10.48476/geober_5_2007, 13.03.2022.

Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (2005). DWA-Regelwerk - Arbeitsblatt DWA-A 138 Planung, Bau und Betrieb von Anlagen zur Versickerung von Niederschlagswasser. Hennef, Deutschland.

Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (2015). DWA-Regelwerk - Merkblatt DWA-M 550 Dezentrale Maßnahmen zur Hochwasserminderung. Hennef, Deutschland.

Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. (1996). DVWK Merkblatt 238/1996 Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen. Bonn.

Howell, T. A. & Evett, S. (2014). THE PENMAN-MONTEITH METHOD. Bushland, Texas, URL: https://www.researchgate.net/profile/Steve-Evett/publication/241492864_The_Penman-Monteith_Method/links/587a5f7e08ae9275d4dee8e3/The-Penman-Monteith-Method.pdf?origin=publication_detail, 30.05.2022.

Sponagel, H. & Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden der Staatlichen Geologischen Dienste und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2005). Bodenkundliche Kartieranleitung. KA5., 5. verb. und erw. Auflage Hannover.

VDI-Gesellschaft Energie und Umwelt (2019). VDI 4640 Blatt 2 - Thermische Nutzung des Untergrunds - Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen. Düsseldorf.

VDI-Gesellschaft Energie und Umwelt (2021). VDI 4640 Blatt 1 - Thermische Nutzung des Untergrunds - Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte. Düsseldorf.

Wagner, S. (2018). Einführung in die Geoströmungstechnik. URL: https://tu-freiberg.de/sites/default/files/media/institut-fuer-bohrtechnik-und-fluidbergbau-230/lehrbrief_einf_geostroemungstechnik.pdf, 04.05.2022.

Abbildungsverzeichnis

	Besucht am:
Abb. 1 Andreas Lebmeier	
Abb. 2 © mcc-berlin	13.06.2022
Abb. 3 © umweltbundesamt	13.06.2022
Abb. 4 © Deutschlandfunk	13.06.2022
Abb. 5 © BR	13.06.2022
Abb. 6 Konzeptskizze	
Abb. 7 Boden-Wasser-Model	
Abb. 8 Beispiel-Model	
Abb. 9 © GeoBasis-DE/BKG	12.06.2022
Abb. 10 © GeoBasis-DE/BKG , Zeichnungsvorlage © Beton Bernrieder	10.06.2022
Abb. 11 Energiezisterne-Skizze, Zeichnungsvorlage © Beton Bernrieder	10.06.2022
Abb. 12 Bodenmatrix	
Abb. 13 © LFU Bayern	24.03.2022
Abb. 14 ©Scheffer u. Schachsabel 2006	
Abb. 15 Evapotranspiration	
Abb. 16 Benutzeroberfläche des Boden-Wasser Modells	
Abb. 17 Jahreswasserbilanz für zwei Quartiers-Szenarien (gestapelte Säulen)	
Abb. 18 Starkregenereignis bei unterschiedlicher Retentionsspeicherauslastung	
Abb. 19 Austrocknungsverhalten des Bodens zweier Quartiers-Szenarien	
Abb. 20 Wärmeströme der Energiezisterne	