



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Softwaregestützte Modellierung der Wasserversorgungsinfrastruktur des iranischen Dorfes Hamzehloo

Masterarbeit

Jakob Hummel



Jakob Hummel
Studiengang: M. Sc. Umweltingenieurwissenschaften

Masterarbeit
Thema: Softwaregestützte Modellierung der Wasserversorgungsinfrastruktur des iranischen Dorfes
Hamzehloo
Tag der Einreichung: 22.09.2023

Interner Ansprechpartner: Prof. Dipl.-Ing. Dr. nat. tech. Wilhelm Urban
Externe Ansprechpartnerin: Dr. Natascha Bagherpour Kashani (Deutsches Bergbau-Museum Bochum)

Technische Universität Darmstadt
Fachbereich Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
Institut IWAR
Fachgebiet Wasserversorgung und Grundwasserschutz



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Technische Universität Darmstadt | Institut IWAR | Franziska-Braun-Straße 7 | 64287 Darmstadt

Aufgabenstellung Masterarbeit

für Herrn Jakob Hummel

Studiengang M.Sc. Umweltingenieurwissenschaften
Technische Universität Darmstadt

Softwaregestützte Modellierung der Wasserversorgungsinfrastruktur des iranischen Dorfes Hamzelooch

Software-based modeling of the water supply infrastructure of the Iranian village of Hamzelooch.

Fachbereich Bau- und
Umweltingenieurwissenschaften

IWAR

Prof. Dipl.-Ing. Dr. nat. techn.
Wilhelm Urban

Wasserversorgung und
Grundwasserschutz

Franziska-Braun-Straße 7
64287 Darmstadt

Tel. +49 6151 16-20603
Fax +49 6151 16-20305
w.urban@iwar.tu-darmstadt.de
www.iwar.tu-darmstadt.de

Datum
23.03.2023

Ihre Nachricht

Unser Zeichen

Problemstellung:

Im Iran ist Wasser eine knappe Ressource, weswegen mit dieser sorgsam, nachhaltig und sparsam umzugehen ist. Im Zuge des 2019 begonnenen Projekts „Wasser, Bildung und Tourismus in der ländlichen Mahneshan-Region/Iran“ der Gerda-Henkel-Stiftung wurde das Fachgebiet beauftragt, für das in der ländlichen Region Zanjan gelegene Dorf Hamzelooch und einem noch zu errichtenden Informations-/Besucherzentrums am nahegelegenen Salzstock die Versorgung mit Trink- und Brauchwasser zu konzipieren und die einzelnen Anlagen zu bemessen.

Aufgrund der vorliegenden klimatisch-ariden Bedingungen von etwa 270 mm Jahresniederschlag sind in der Region kaum größere nutzbare Wasservorkommen vorzufinden. Zudem besitzen die allermeisten Wasservorkommen inklusive des Flusswassers eine Salzkonzentration von etwa 7.000 mg/l TDS, die für Trinkwasserzwecke ungeeignet sind und deswegen eine Aufbereitung zu Trinkwasser erfordern.

Darüber hinaus ist für die Konzeption der Wasserversorgungsinfrastruktur von den in den benachbarten Dörfern der Region vorzufindenden, funktionierenden und von der Bevölkerung akzeptierten technischen Anlagen auszugehen.

Sparkasse Darmstadt
Konto Nr. 704 300
BLZ 508 501 50
IBAN: DE368 085 015 000 007 043 00
BIC: HELADEF1DAS
Steuernr. 07 226 00139
Ust-ID-Nr. DE 111 606 628



Bereits im Jahre 2019 wurden im Rahmen einer Abschlussarbeit am Institut verschiedene Konzeptvarianten für die Versorgungsinfrastruktur des Dorfes erarbeitet. Das Projektteam beschloss anschließend eine Vorzugsvariante, deren Umsetzung angestrebt wird. Seither wurden bei mehreren Aufenthalten lokale Partner in die weitere Planung eingebunden und die Umsetzung erster Projektabschnitte eingeleitet.

Masterarbeit:

Ziel der Masterarbeit ist die Aktualisierung und Erweiterung des 2019 erstellten Versorgungskonzepts mittels geeigneter Modellierungssoftware und neuen Erkenntnissen der aktuellen Kampagnen.

Dazu soll der aktuelle Zustand der Wasserversorgungsinfrastruktur im Dorf aufgenommen und auf Veränderungen seit der letzten Bestandsaufnahme im Jahre 2019 untersucht werden. Dabei soll ein besonderes Augenmerk auf die Umsetzung des bereits 2019 erarbeiteten, ursprünglichen Konzepts gelegt werden.

Es wird angestrebt, den beteiligten Projektpartnern und beauftragten Unternehmen künftig eine bessere Vorstellung des Projekts geben zu können sowie eine detailliertere Planung der weiteren Projektabschnitte zu ermöglichen. Dazu sollen das Dorf selbst sowie das gesamte Wasserversorgungskonzept inklusive Transport- und Verteilnetz, Förderung, Aufbereitung und Speicherung digital modelliert werden.

Um neben einem hohen Detailgrad auch eine hohe Dichte zusätzlicher Informationen gewährleisten zu können (bspw. Rohrdurchmesser, Stromverteilung, Speicherkapazitäten), sollen geeignete Modellierungssoftwares (BIM, CAD, o.ä.) genutzt werden.

Neben der ursprünglichen Planung werden Kenntnisse aus den beiden durchgeführten Kampagnen im Juli und Oktober des Jahres 2022 in die Abschlussarbeit integriert. Weiterhin soll bei der Überarbeitung des Versorgungskonzepts auf lokale Besonderheiten wie Besitzansprüche, verfügbare Materialien und klimatische Bedingungen geachtet werden.



Arbeitsschritte

- Ermittlung des aktuellen Ist-Zustandes und Vergleich mit damaliger Bestandsaufnahme mit Augenmerk auf Umsetzung des ursprünglichen Konzepts.
- Berücksichtigung lokaler Besonderheiten, aktueller Kenntnisse und der klimatischen Bedingungen in der gesamten Planung
- Generierung eines digitalen Zwillings des Dorfes (inklusive der näheren Umgebung in Form eines digitalen Geländemodells)
- Erstellung eines digitalen Modells der gesamten künftigen Wasserversorgungsinfrastruktur
- Zusammenfassung & Ausblick

Ansprechpartner in:

Intern: Prof. Dipl. - Ing. Dr. nat. techn. Wilhelm Urban

Extern: Dr. Natascha Bagherpour Kashani (Deutsches Bergbau-Museum Bochum)

Bearbeitungszeit:

26 Wochen

Die Arbeit wird als externe Arbeit durchgeführt.

Prof. Dipl.-Ing. Dr. nat. techn. Wilhelm Urban

Danksagung

Zuerst gebührt mein Dank Herrn Prof. Wilhelm Urban und Christian Eichhorn für die Möglichkeit und Betreuung dieser Masterarbeit sowie die Unterstützung weit über diese Arbeit hinaus. Danke für die Ideen, Unterstützung und ständige Erreichbarkeit insbesondere während der Kampagnen vor Ort.

Ein herzliches Dankeschön gilt auch Dr. Natascha Bagherpour Kashani für die Geduld, Organisation und tatkräftige Unterstützung vor allem während der beiden Kampagnen. Ohne dich wäre die Arbeit in dieser Form nicht möglich gewesen.

Außerdem danke ich auch allen Projektbeteiligten in Iran, die trotz der schwierigen Umstände das Vorhaben mit großem Engagement weiterführen. Danke besonders an Abolfazl, Hamed, Majid sowie stellvertretend für alle Dorfbewohner Hajj Aziz.

An dieser Stelle möchte ich mich auch ganz herzlich bei meiner Familie und meinen Freunden bedanken, die mich nicht nur während dieser Masterarbeit, sondern auch im Laufe meines gesamten Studiums unterstützt und motiviert haben.

Abstract

Die Planung und Modellierung der Wasserversorgungsinfrastruktur Hamzehloos basieren auf dem ursprünglichen Konzept aus dem Jahre 2019. Aktuelle Erkenntnisse, die während der Kampagnen im Jahre 2022 gewonnen wurden, ergeben drei relevante Änderungen. Als erstes wechselt der Standort des Gebäudes der Wasseraufbereitungsanlage, wodurch auch Änderungen hinsichtlich des Trassenverlaufs resultieren. Als zweites ist die Vertiefung des Reza abaad Brunnens zu nennen. Dabei kommt aufgrund des Rammverfahrens auch ein neuer Ausbau des Brunnens zustande. Der dritte Punkt stellt die geringfügige Verkleinerung des Rohrdurchmessers der Brauchwasserleitung auf DN 75 dar.

Die Wasserversorgungsinfrastruktur besteht aus dem Brunnenhaus, dem Reservoir, dem Gebäude der Wasseraufbereitung sowie dem Leitungsnetz. Die Konstruktion der Bauwerke beruht neben den iranischen Bestimmungen auch auf dem DVGW-Regelwerk sowie einer Vielzahl von DIN-Normen, um die besten Ergebnisse zu erzielen und die Statik sicherzustellen. Obwohl die lokale Bauweise im Fokus steht, werden auch neue Elemente, wie beispielsweise der Hochwasserschutz des Brunnenhauses, in die Planungen integriert.

Um die gewünschte Ausführung allen Projektbeteiligten deutlich zu machen, werden sowohl von den Gebäuden als auch vom gesamten Dorf detaillierte digitale Modelle erstellt. Für die Modellierung kommen drei Softwareanwendungen zum Einsatz. Die Erstellung einzelner Bauteile erfolgt mit Fusion 360. Diese Komponenten werden anschließend in die Gebäudemodelle importiert, welche mit Revit konstruiert werden. InfraWorks vereint alle Komponenten in einem digitalen Geländemodell, welches das Dorf und dessen nähere Umgebung impliziert. Abschließend werden die Bauten der Wasserversorgungsinfrastruktur mit der Trasse verbunden. Zudem wird ein Modell des geplanten Besucherzentrums erstellt.

The planning and modelling of Hamzehloo's water supply infrastructure are based on the original concept from 2019. Current findings obtained during the campaigns in 2022 result in three relevant changes. Firstly, the location of the water treatment plant building is changing, which also results in changes regarding the route. The second change is the deepening of the Reza abaad well. This also results in a new extension of the well due to the pile driving process. The third point is the slight reduction of the pipe diameter of the service water pipe to DN 75.

The water supply infrastructure includes the well house, the reservoir, the water treatment building and the piping network. In addition to the Iranian regulations, the construction of the structures is also based on the DVGW regulations as well as many DIN standards in order to achieve the best results and to ensure structural stability. Although the focus is on local construction methods, new elements, such as flood protection for the well house, are also integrated into the planning.

In order to make the desired design clear to all project participants, detailed digital models are created of the buildings as well as of the entire village. Three software applications are used for the modelling. The creation of individual components is done with Fusion 360. These components are then imported into the building models, which are constructed with Revit. InfraWorks combines all components in a digital terrain model, which implies the village and its surroundings. Finally, the buildings of the water supply infrastructure are connected to the route. In addition, a model of the planned visitor centre is created.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	i
Abstract	ii
Abbildungsverzeichnis	v
Tabellenverzeichnis	viii
Abkürzungsverzeichnis	ix
1.....Einleitung	1
1.1. Zielsetzung	1
1.2. Aufbau der Arbeit	2
2.....Grundlagen	3
2.1. Verwendete Normen und Arbeitsblätter	3
2.2. Abschlussbauwerke für Brunnen	5
2.3. Umkehrosmose als Kernelement der Wasseraufbereitung	8
3.....Methodik	10
3.1. Bestandsaufnahme	10
3.1.1. Befragungen vor Ort	10
3.1.2. Pumpversuche nach DVGW W 111	12
3.2. Verwendete Programme	16
3.2.1. Autodesk Revit	17
3.2.2. Autodesk InfraWorks	19
3.2.3. Autodesk Fusion 360	20
3.2.4. Alternative Softwares	21
3.2.5. Vergleich der verschiedenen Softwares	23
3.2.6. Diver-Office	27
4.....Ermittlung des IST-Zustandes	29
4.1. Aktuelle Situation vor Ort	29
4.2. Pumpversuche	37
4.3. Analysen der Wasserproben	45
4.4. Endgültige Wahl des Brunnens zur Wasserförderung	46
4.5. Vertiefung des Reza abaad Brunnens	47
5.....Generierung eines digitalen Zwillings des Dorfes Hamzehloo	51
5.1. Topografie	51
5.2. Gebäude	51
5.3. Besucherzentrum	52
5.3.1. Gebäude	54
5.3.2. Innenausstattung	60
5.3.3. Technische Gebäudeausrüstung	62
5.3.4. Topografie	63
5.4. Ausgrabungsstätte	64

5.5. Infrastruktur	65
6.....Modellierung der künftigen Wasserversorgungsinfrastruktur	67
6.1. Wasserförderung	67
6.1.1. Gebäude	67
6.1.2. Wasserspezifische Anlagen	69
6.1.3. Technische Gebäudeausrüstung	73
6.1.4. Topografie	76
6.2. Wasserspeicherung	78
6.2.1. Gebäude	78
6.2.2. Innenausstattung	80
6.2.3. Technische Gebäudeausrüstung	81
6.2.4. Topografie	84
6.3. Wasseraufbereitung	85
6.3.1. Gebäude	85
6.3.2. Wasserspezifische Anlagen	88
6.3.3. Innenausstattung	91
6.3.4. Technische Gebäudeausrüstung	92
6.3.5. Topografie	95
6.4. Transport- und Verteilnetz	95
6.4.1. Trassenverlauf	96
6.4.2. Kritische Stellen im Verteilnetz	98
6.5. Import der Gebäude von Revit in InfraWorks	100
6.6. Visualisierung der digitalen Modelle mittels Kamerafahrten	100
6.6.1. Walkthrough in Revit	100
6.6.2. Drehbuch in InfraWorks	101
7.....Zusammenfassung und Ausblick	102
Glossar	I
Literaturverzeichnis	VIII
Anhang	XIII

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Abschlussbauwerk in Sonderbauweise nach DVGW W 122 (A)	6
Abbildung 2: Abschlussbauwerk für Vertikalfilterbrunnen nach DVGW W 122 (A)	7
Abbildung 3: Prinzipieller Aufbau eines Membranmoduls	8
Abbildung 4: R&I-Fließbild der Aufbereitungsanlage	9
Abbildung 5: Schema einer Kombination von Brunnen- und Grundwasserleitertest.....	12
Abbildung 6: Datenlogger und Lichtlot zur Bestimmung des Wasserstands	14
Abbildung 7: Absenktrichter während des Pumpversuches	15
Abbildung 8: Benutzeroberfläche Autodesk Revit	17
Abbildung 9: Rubriken der Multifunktionsleiste von Revit	18
Abbildung 10: Rubrik <i>Ändern</i> im Programm Autodesk Revit	18
Abbildung 11: Benutzeroberfläche Autodesk InfraWorks	19
Abbildung 12: Rubriken der Multifunktionsleiste von InfraWorks	20
Abbildung 13: Benutzeroberfläche von Autodesk Fusion 360	21
Abbildung 14: Rubriken der Multifunktionsleiste von Fusion 360	21
Abbildung 15: Benutzeroberfläche von Rhino	22
Abbildung 16: Benutzeroberfläche von Nemetschek ALLPLAN	23
Abbildung 17: Benutzeroberfläche der Software Diver-Office	28
Abbildung 18: Alter (blau) und neuer Standort (gelb) des Gebäudes der Wasseraufbereitungsanlage	30
Abbildung 19: Lagerung der PE-Rohre im Dorf Hamzehloo	31
Abbildung 20: Platzieren der Stahlgestänge zur Bewehrung des Fundaments und der Stützen	32
Abbildung 21: Gießen des Fundaments	32
Abbildung 22: Hochziehen der Außenwände	32
Abbildung 23: Fertigstellung des Gebäudevorsprungs	32
Abbildung 24: Positionierung der Sandwichelemente des Dachaufbaus	33
Abbildung 25: Aufbringen der Betondeckschicht	33
Abbildung 26: Gesamtübersicht des Rohbaus	33
Abbildung 27: Leitungsverlegung zum Brunnen	34
Abbildung 28: Leitungsverlegung zum Gebäude der Aufbereitungsanlage	34
Abbildung 29: Leitungsverlegung in Richtung Ausgrabungsstätte	34
Abbildung 30: Leitungsverlegung mittels Bagger entlang der Routen	34
Abbildung 31: Erdbebenrisikogebiete in der Region Zanzan	36
Abbildung 32: Brunnenstandorte um Hamzehloo	37
Abbildung 33: Pumpversuch am Shah Alli Brunnen	38
Abbildung 34: Daten des Baro-Divers während des Pumpversuches am Shah Alli Brunnen	38
Abbildung 35: Daten des CTD-Divers während des Pumpversuches am Shah Alli Brunnen	39
Abbildung 36: Vergleich der Absenkungskurven	40
Abbildung 37: Vergleich der Aufspiegelungskurven	40
Abbildung 38: Bohrbrunnen bei Ebrahimabad	41
Abbildung 39: Auswertung des Pumpversuches am Ebrahimabad Brunnen	42
Abbildung 40: Pumpversuch am Hajj Aziz Brunnen	42
Abbildung 41: Ausbau des Hajj Aziz Brunnens	42
Abbildung 42: Auswertung des Pumpversuches am Hajj Aziz Brunnen	43
Abbildung 43: Reza abaad Brunnen im Juni 2022 vor den Vertiefungsmaßnahmen	44
Abbildung 44: Probenahme	45
Abbildung 45: Bodenzusammensetzung nahe des Reza abaad Brunnens	48
Abbildung 46: Sicherung der Brunnenarbeiter per Seilwinde	49
Abbildung 47: Eimerweise Förderung des Materials während der Handgrabung	49
Abbildung 48: Ablassen der kleineren Brunnenringe	50

Abbildung 49: Ablassen des Brunnenarbeiters für die Handgrabungen	50
Abbildung 50: Schweißen und Schlitten des Rohres	50
Abbildung 51: Positionierung des Brunnenrohres	50
Abbildung 52: Aufstellen des Bohrgeräts	50
Abbildung 53: Nahaufnahme des Bohrgeräts	50
Abbildung 54: Ausschnitt der Dorfmitte	52
Abbildung 55: Grundriss des Besucherzentrums	53
Abbildung 56: Außenansicht des Besucherzentrums	54
Abbildung 57: Streifenfundamente	55
Abbildung 58: Dachaufbau aus Sandwichelementen	57
Abbildung 59: Modellerte Dachkonstruktion mit Fusion 360	58
Abbildung 60: Schnitt des Besucherzentrums ohne Dach und Träger	60
Abbildung 61: Jahresganglinie einer potenziellen PV-Anlage in Hamzehloo	61
Abbildung 62: SBR-Behälter	63
Abbildung 63: Ausgrabungsstätte von oben	64
Abbildung 64: Modellierung der Ausgrabungsstätte	64
Abbildung 65: Modellierung der Infrastruktur	65
Abbildung 66: Schnitt des Brunnenhauses	67
Abbildung 67: Vergleich der Dachluken in echt (A) und im Modell (B)	69
Abbildung 68: Tragwerk des Brunnenhauses	69
Abbildung 69: Detailaufnahmen des modellierten Brunnenkopfes	70
Abbildung 70: Vergleich der Pumpe und ihres digitalen Zwillings	72
Abbildung 71: Offen geschnittenes Brunnenhaus	73
Abbildung 72: Innenansicht des Brunnenhauses	74
Abbildung 73: Schaltschrank des Brunnenhauses in Hesar im Vergleich mit der modellierten Version	75
Abbildung 74: Heizkörper in Hesar im Vergleich mit der modellierten Version	75
Abbildung 75: Stromlinienförmiger Hochwasserschutz	77
Abbildung 76: Offen geschnittenes Modell des Reservoirs	78
Abbildung 77: Eingabefenster des Plattenfundaments in Revit	79
Abbildung 78: Vergleich des Wasserbehälters mit der modellierten Version	80
Abbildung 79: Querschnitt eines Schwimmerschalters	83
Abbildung 80: Bau des Reservoirs in den Hang	84
Abbildung 81: Außenansicht des Gebäudes der Wasseraufbereitung	85
Abbildung 82: 3D-Schnitt des Gebäudes der Wasseraufbereitung	88
Abbildung 83: Vergleich des Bedienterminals von Hesar und des Modells	89
Abbildung 84: Vergleich der Umkehrosmoseanlage in der Fabrik mit dem digitalen Modell	90
Abbildung 85: Detailausschnitt der Rohrleitungen und Armaturen bei der Wasseraufbereitung	92
Abbildung 86: Verlauf der Trassen	96
Abbildung 87: Querung der Straße	98
Abbildung 88: Anbindung der Leitungen in InfraWorks	98
Abbildung 89: Außenansicht des Sammelschachts	99
Abbildung 90: Innenansicht des Sammelschachts	99
Abbildung 91: Datenblatt der Tauchmotorpumpe 4SKM200	XIII
Abbildung 92: Datenblatt der Membran LG BW 4040 R	XIV
Abbildung 93: Draufsicht auf das Untersuchungsgebiet in InfraWorks	XV
Abbildung 94: Beispiel einer Stellwand im Besucherzentrum	XVI
Abbildung 95: Implementierung des Besucherzentrums in das digitale Geländemodell	XVII
Abbildung 96: Verlauf der Gastrasse in der Region um Hamzehloo	XVII
Abbildung 97: Außenansicht des Brunnenhauses inklusive des Brunnens	XVIII
Abbildung 98: Innenraum der Brunnenstube bei künstlicher Beleuchtung	XIX
Abbildung 99: Gebäude der Aufbereitungsanlage mit der mobilen Holzrampe	XIX
Abbildung 100: Grundriss des Brunnenhauses mit Bemaßungen	XX

Abbildung 101: Seitenansicht West des Brunnenhauses mit Bemaßungen	XXI
Abbildung 102: Seitenansicht Süd des Brunnenhauses mit Bemaßungen	XXII
Abbildung 103: Grundriss des Reservoirs mit Bemaßungen	XXIII
Abbildung 104: Seitenansicht West des Reservoirs mit Bemaßungen	XXIII
Abbildung 105: Grundriss des Sammel schachts mit Bemaßungen	XXIV
Abbildung 106: Grundriss des Gebäudes zur Wasseraufbereitung mit Bemaßungen	XXIV
Abbildung 107: Seitenansicht Nord des Gebäudes zur Wasseraufbereitung mit Bemaßungen	XXV
Abbildung 108: Seitenansicht West des Gebäudes zur Wasseraufbereitung mit Bemaßungen	XXV

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vergleich der verschiedenen Programme	27
Tabelle 2: Erläuterungen zu den Erdbebenzonen	36
Tabelle 3: Ergebnisse der Wasseranalysen	45
Tabelle 4: Eigenschaften der Ebenen	54
Tabelle 5: Übersicht der Rohrleitungen im Verteilnetz	97

Abkürzungsverzeichnis

ASR	Technische Regeln für Arbeitsstätten/Arbeitsstättenregeln
BIM	Building Information Modeling
CAD	Computer Aided Design
CIP	Cleaning in Place
DBM	Deutsches Bergbau-Museum Bochum
DG	Dachgeschoss
DGM	Digitales Geländemodell
DGUV	Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung
DIN	Deutsches Institut für Normung
DIN EN ISO	Deutsche Industrie-Norm und Europäische Norm für Internationale Organisation für Standardisierung
DN	Diameter Nominal (Nennweite)
DOC	Dissolved organic carbon (gelöster organischer Kohlestoff)
DVGW	Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches
EC	Electrical conductivity (elektrische Leitfähigkeit)
EG	Erdgeschoss
GIS	Geoinformationssystem
GOK	Geländeoberkante
GPS	Global Positioning System
HDPE	High Density Polyethylen
HPL	High Pressure Laminate
KG	Kellergeschoss
LED	Light-emitting diode
NURBS-Kurve	Non Uniform Rational Basic Splines
OK	Oberkante
PE	Polyethylen
PTFE	Polytetrafluorethylen (Teflon Kunststoff)
PV	Photovoltaik
PVC	Polyvinylchlorid
ROK	Rohroberkante
SBR	Sequencing batch reactor
STB	Stahlbeton
TDS	Total dissolved solids (Summe der in einer Lösung gelösten Feststoffe)
TGA	Technische Gebäudeausrüstung
UK	Unterkante
VDI	Verein Deutscher Ingenieure

1. Einleitung

Hamzehloo liegt inmitten der Mahneshan-Region im Nordwesten Irans. Früher bauten die Bewohner des Dorfes Reis an, doch dies ist heutzutage aufgrund klimatischer Veränderungen nicht mehr möglich. Zwar bewirtschaften sie weiterhin ihre Felder und betreiben Viehzucht, doch immer mehr Bewohner, insbesondere die jüngere Generation, suchen sich Arbeit in der Stadt. Dies ist problematisch, denn das Dorf Hamzehloo ist der einzige Nachbar und Schutz des antiken Salzbergwerks Chehrabad/Douzlakh. In dieser eingetragenen Kulturerbestätte finden seit 2004 wissenschaftliche Untersuchungen statt, nachdem dort Mumien gefunden wurden, die wegen des hohen Salzgehaltes im Boden gut erhalten waren (Bagherpour Kashani 2023). In diesem Zuge soll in Hamzehloo ein Informations- und Besucherzentrum errichtet werden. Im Rahmen des Projekts *Wasser, Bildung und Tourismus in der ländlichen Mahneshan-Region/Iran*, gefördert durch die Gerda Henkel Stiftung, wurde das Fachgebiet Wasserversorgung und Grundwasserschutz des Instituts IWAR der Technischen Universität Darmstadt vom Deutschen Bergbau Museum Bochum und dem Archäologischen Museum Frankfurt beauftragt, die Wasserversorgung für das Dorf Hamzehloo zu konzipieren.

Die Auswirkungen des Klimawandels verschärfen die ohnehin bereits bestehende Wasserknappheit der Region (WRI 2023). Deshalb muss mit der Ressource Wasser nachhaltig und sorgsam umgegangen werden. Die hohe Salinität des Grundwassers erschwert die Nutzung als Trinkwasser, weswegen eine Aufbereitung des Wassers unvermeidbar ist. Vor Ort ist es üblich, dass bei der Versorgung zwischen Brauch- und Trinkwasser unterschieden wird. Das Trinkwasser deckt dabei nur die Grundbedürfnisse, wie Kochen und Trinken. Da Hamzehloo bisher nicht über eine solche Infrastruktur verfügt, muss dieses mit einem Tankwagen bereitgestellt werden. Das Brauchwasser beziehen die Bewohner aus einem Brunnen im Dorf.

Bereits im Jahre 2019 fanden Kampagnen statt, wobei verschiedene Konzeptvarianten für die Wasserversorgungsinfrastruktur entwickelt wurden. Mit Hilfe lokaler Projektbeteiligter erfolgte inzwischen die Umsetzung erster Projektabschnitte, die den Grundstein für die Realisierung der Vorzugsvariante legen.

1.1. Zielsetzung

Ziel der Masterarbeit ist die Aktualisierung und Erweiterung des im Jahre 2019 erstellten Konzeptes auf Basis der neuen Erkenntnisse der aktuellen Kampagnen. Um den Projektpartnern sowie den beauftragten Unternehmen eine bessere Vorstellung des Projektes geben zu können, wird die gesamte Wasserversorgungsinfrastruktur mit Hilfe geeigneter Software modelliert. Dies impliziert neben der Förderung, der Speicherung und der Aufbereitung auch das Transport- und Verteilnetz. Damit eine detaillierte Planung erfolgen kann, müssen die digitalen Modelle einen hohen Detailgrad aufweisen und über zusätzliche Informationen wie beispielsweise den Rohrdurchmesser verfügen. Darüber hinaus ist bei dem Konzept darauf zu achten, dass die lokalen Besonderheiten und klimatischen Bedingungen berücksichtigt werden. Hierbei stehen besonders folgende Fragen im Fokus:

- Wie kann eine ausreichende und nachhaltige Wasserversorgungsinfrastruktur für das Dorf Hamzehloo realisiert werden?
- Welche Softwareanwendungen eignen sich für eine detaillierte Darstellung des Projekts?

Die erste Frage bezieht sich hierbei vornehmlich auf die bauliche Umsetzung des Vorhabens, wobei auch die Klimaresilienz der Infrastruktur betrachtet wird. Im Verlauf dieser Arbeit werden diese Forschungsfragen vertieft untersucht und die Ergebnisse ausgearbeitet.

1.2. Aufbau der Arbeit

Zuerst wird ein Überblick hinsichtlich der relevanten theoretischen Grundlagen gegeben, um ein besseres Grundverständnis zu schaffen. Daran schließt die Ausführung zur Methodik an. Dabei wird einerseits erläutert, wie die vor Ort gesammelten Daten gewonnen werden. Andererseits stehen zudem die Programme im Fokus, die im Laufe der Arbeit verwendet werden. Hierbei erfolgt auch ein Vergleich zwischen den verschiedenen Softwareanwendungen. Das Ziel dabei ist es, deren Potenzial zu identifizieren und dadurch ein optimales Ergebnis im Bereich der digitalen Modelle zu generieren.

Anschließend rücken die Erkenntnisse der aktuellen Kampagnen in den Vordergrund. Bei der Ermittlung des IST-Zustandes wird die Situation mit der damaligen Bestandsaufnahme verglichen. Dies stellt sicher, dass sowohl Änderungen als auch neue Erkenntnisse bei der Konzeptionierung berücksichtigt werden. Aufgrund behördlicher Anweisungen mussten erneut Pumpversuche durchgeführt und Wasserproben analysiert werden. Basierend auf den Ergebnissen erfolgt eine finale Entscheidung bezüglich der Wahl des Brunnens.

Der weitere Verlauf der Arbeit konzentriert sich auf die Modellierung. Zuerst wird ein digitaler Zwilling des Dorfes Hamzehloo inklusive der näheren Umgebung generiert. Dieser beinhaltet neben der Topografie auch die Gebäude des Dorfes sowie die bereits bestehende Infrastruktur. Erst danach folgt die Modellierung der künftigen Wasserversorgungsinfrastruktur, weil diese Bauwerke in das Dorf integriert werden. Die Reihenfolge der Gebäude richtet sich nach der Fließrichtung. Dementsprechend beginnen die Ausführungen mit dem Brunnenhaus, in dem das Wasser gefördert wird. Abschließend wird das Reservoir und das Gebäude der Wasseraufbereitung modelliert. Anhand der bestehenden Bauwerke kann das Leitungsnetz implementiert werden.

2. Grundlagen

Zunächst erfolgt ein theoretischer Überblick bezüglich der technischen Grundlagen, die im Projekt Anwendung finden. Dazu werden die relevantesten DIN-Normen und DVGW-Arbeitsblätter, die in der Arbeit zum Tragen kommen, kurz beschrieben. Des Weiteren sind das Abschlussbauwerk für Brunnen sowie die Umkehrosmose explizit hervorgehoben. Beide Komponenten stellen essenzielle Kernpunkte einer erfolgreichen Projektumsetzung dar.

Eine strikte, normgerechte Realisierung ist jedoch weder zielführend noch gewollt. Grundsätzlich ist stattdessen primär auf die lokale Bauweise zu setzen. Im Sinne der Nachhaltigkeit und langfristigen Nutzung der Wasserversorgungsinfrastruktur bedarf es einiger grundsätzlicher Maßnahmen, die beim Bau berücksichtigt werden müssen. Diese betreffen beispielsweise die Sicherheit der Bauten. Sofern möglich, erfolgt hier die Umsetzung nach deutschen Standards. Dabei ist jedoch stets darauf zu achten, dass alle Projektbeteiligten über die Hintergründe informiert werden. Dies erhöht die Akzeptanz und schafft Verständnis für die Entscheidungsfindung, warum an manchen Stellen Abweichungen von der örtlichen Vorgehensweise Priorität haben.

2.1. Verwendete Normen und Arbeitsblätter

DIN-Normen

Für eine erfolgreiche Umsetzung des Vorhabens muss die **Statik** aller Gebäude gewährleistet sein. DIN EN 1990 definiert die Grundlagen der Tragwerksplanung. Hierbei werden grundlegende Anforderungen und Bemessungsprinzipien einschließlich der Nachweise erläutert. DIN EN 1991 knüpft direkt an die vorherige Norm an. Dort stehen die Einwirkungen auf Tragwerke im Vordergrund. Die Ausführungen fokussieren sich auf unterschiedliche Bemessungssituationen, u. a. von Eigengewicht und Nutzlasten. Im dritten Teil der Norm werden die Anforderungen bei Schneelasten festgelegt, während sich Teil 4 auf die Regeln zur Ermittlung von Windlasten konzentriert. Grundlegende Bemessungsparameter stehen im Programm Autodesk Revit zur Verfügung. Die dort hinterlegten Lastannahmen basieren auf den Berechnungsgrundlagen der Normen und gewährleisten somit die Standsicherheit der Bauten. Eine weitere wichtige Norm, die bei der Bauausführung Beachtung finden muss, stellt DIN EN 1998-1 dar. Diese regelt die Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben. Erkenntnisse aus den Kampagnen im Jahre 2022 verdeutlichen die Relevanz dieses Themas in der Region. Näheres wird in Kapitel 4.1 erläutert. Infolge der lokalen Bauweise sind insbesondere die Anforderungen und Regeln für Mauerwerksbauten von Bedeutung.

Außerdem stellt die **Gebäudehülle** eine weitere, fundamentale Komponente eines Bauwerkes dar. Auch wenn die geplanten Bauten größtenteils keine Wohngebäude sind, umfassen jene dennoch sensible technische Geräte, die besonderen Schutz erfordern. DIN EN ISO 13793 regelt das wärmetechnische Verhalten von Gebäuden. Im vorliegenden Fall ist v. a. die Frosttiefe entscheidend. Darüber hinaus bedarf es Erfahrungen aus der energetischen Bewertung von Gebäuden (DIN EN 12831-1). Denn nicht nur wegen der Rohrleitungen, sondern auch wegen Anlagenkomponenten muss eine Temperatur über dem Gefrierpunkt im Inneren zu jedem Zeitpunkt sichergestellt sein. Für die kalte Jahreszeit kann ermittelt werden, ob Heizen erforderlich ist oder nicht. Zudem ist bei allen erdberührten Bauteilen eine Abdichtung des Bauwerks notwendig (DIN 18533-1). Die Abdichtung bezieht sich neben bahnenförmigen Abdichtungsstoffen auch auf flüssig zu verarbeitende Materialien. Des Weiteren beleuchtet die Norm klassische Bodenfeuchte, aber auch mit drückendem Wasser unterschiedliche Varianten der Einwirkung von Wasser. DIN 18531-1 legt darüber hinaus noch Anforderungen bezüglich der Abdichtung von Dachflächen fest. Dies schließt auch die Dachentwässerung ein. Dementsprechend liegt der Fokus auf Niederschlagswasser. Die Bestimmungen sind dabei v. a. bei der Realisierung des Hochwasserschutzes bedeutend.

Die technischen Elemente benötigen zudem eine störungsfreie **Elektroinstallation**. Eine geordnete Leitungsverlegung reduziert potenzielle Problemfelder. DIN 18015-1 schreibt eine systematische Anordnung von Stromleitungen sowie Schaltern und Steckdosen vor, die in bestimmten Höhen angebracht werden. Dadurch erhöht sich neben der Sicherheit auch der Komfort für die Nutzenden. Die Norm orientiert sich in erster Linie an Wohngebäuden. Allerdings gilt sie ebenfalls für Bauwerke, welche mit Gebäudesystemtechnik ausgestattet sind. Für die Kabelverlegung im Erdreich wird DIN VDE 0100-520 herangezogen. Diese schreibt zu den Eigenschaften von Erdkabeln vor, zum anderen müssen die Leitungen so verlegt werden, dass sie durch keine äußeren Einflüsse Schaden nehmen.

Neben der Elektrik fallen auch die Komponenten der **Wasserversorgungsinfrastruktur** unter Normen. Beispielsweise regelt DIN EN ISO 3126 die exakten Maße von Rohren sowie Formstücken aus Kunststoffen. DIN 4926 präzisiert den Aufbau von Brunnenköpfen aus Stahl. Dieser stellt für die nachhaltige Versorgung des Dorfes mit Trinkwasser eine wichtige Rolle dar. Denn der Abschluss soll die Hygieneanforderungen langfristig sicherstellen und das Eindringen von Fremdstoffen verhindern. Für den Aushub der Trasse gelten zudem Bestimmungen der DIN 4124. Für geringe Tiefen, die in diesem Fall zutreffen, entfallen z. B. rechnerische Nachweise zur Standsicherheit. Dies vereinfacht die Tätigkeiten vor Ort immens – ohne die Sicherheit der Arbeitenden zu gefährden. Gleichzeitig können die in der Norm definierten Böschungswinkel auch auf den Schutzwall des Brunnenhauses übertragen werden.

DVGW-Arbeitsblätter

Bedeutender für die Wasserversorgungsinfrastruktur sind allerdings die verschiedenen Arbeitsblätter des Deutschen Vereins des Gas- und Wasserfaches (DVGW). Unter anderem gibt DVGW W 400-1 Einblicke in die Planung von Wasserverteilungsanlagen. Es zeigt, wie **Rohre** in der Trasse grundsätzlich verlegt werden sollen, welche Armaturen und Drücke von Bedeutung sind und definiert Vorgaben zu kritischen Stellen, wie z. B. Anschlussleitungen und Gebäudeeinführungen. Teil 2 des Arbeitsblattes richtet den Fokus auf den Bau und die notwendige Druckprüfung, während Teil 3 den Betrieb und die Instandhaltung behandelt. DVGW W 397 beschreibt das Verfahren zur Ermittlung der erforderlichen Verlegetiefen von Wasseranschlussleitungen. Die notwendigen Überdeckungen der Rohrleitungen sind auf Basis der lokalen klimatischen Bedingungen zu berechnen, sodass sowohl der Frostschutz gewährleistet ist als auch zu hohe Wassertemperaturen im Sommer verhindert werden. Des Weiteren bedarf es Rohrzubehör. Dazu gehören Absperrarmaturen (DVGW W 332). Das Arbeitsblatt unterscheidet Schieber, Absperrklappen, Ventile und Rückflussverhinderer.

Eine weitere Technische Regel, die hinsichtlich der Wasserspeicherung zum Tragen kommt, stellt DVGW W 300-1 (A) dar. Diese gibt Leitlinien zur Planung und zum Bau von **Trinkwasserbehältern** vor. Dies schließt nicht nur die generellen Planungen zum Gebäude ein, sondern erstreckt sich auch von der technischen Ausrüstung über die Tragwerksplanung bis hin zur Wasserdichtheitsprüfung bei der Inbetriebnahme. Insbesondere bei der Verteilung von Trinkwasser ist eine hygienische Unbedenklichkeit essenziell. DVGW W 270 stellt sicher, dass lediglich Werkstoffe eingesetzt werden, die keine Vermehrung von Mikroorganismen nach sich ziehen, wenn sie mit Trinkwasser in Kontakt kommen.

Entscheidend für die **Wasserförderung** ist der Brunnen an sich. Hierbei müssen sowohl technische als auch wasserwirtschaftliche Anforderungen berücksichtigt werden. DVGW W 123 schreibt den Prozess des Baus und Ausbaus von Vertikalfilterbrunnen vor. Dabei wird auch auf die unterschiedlichen Ausbauparameter Bezug genommen. Die technische Ausrüstung in der ländlichen Region Irans stellt einen erheblichen Gegensatz zu der in Deutschland dar. Dennoch basieren die meisten Arbeiten auf demselben Grundprinzip. Um den Brunnen bestmöglich zu schützen, soll dieser in ein Abschlussbauwerk integriert werden (DVGW W 122 (A)). Kapitel 2.2 erläutert die Anforderungen und baulichen Ausführungen des Brunnenhauses im Detail. Nicht nur der Brunnen, sondern auch dessen unmittelbare Umgebung spielt in der Wasserversorgung eine große Rolle. DVGW W 101 (A) gibt Richtlinien für Trinkwasserschutzgebiete vor. Das iranische Pendant schreibt ebenfalls besondere

Schutzmaßnahmen im Fassungsbereich vor und schränkt beispielsweise den Zugang zu den Anlagen durch bauliche Maßnahmen ein.

Um die Ergiebigkeit eines Grundwasservorkommens zu erkunden oder die Leistungsfähigkeit eines Brunnens zu überprüfen, kommen **Pumpversuche** zum Einsatz (DVGW W 111). Kapitel 3.1.2 beschreibt das grundsätzliche Prinzip sowie die Durchführung von Pumpversuchen im Allgemeinen. Im Kapitel 4.2 erfolgt anschließend die Auswertung der Pumpversuche aus den Kampagnen des Jahres 2022.

Sonstige Regelungen

Auch Technische Regeln für Arbeitsstätten stellen wichtige Regularien dar. Besonders im Bereich der **Arbeitssicherheit** ist auf eine Einhaltung zu achten, um das Gefährdungspotenzial der Arbeitenden während der Projektumsetzung zu minimieren. Ob die Maßnahmen vor Ort beherzigt werden, bleibt aufgrund der fehlenden Kontrollmöglichkeiten unbeantwortet. Dennoch können bauliche Schritte unternommen werden, um die Sicherheit im laufenden Betrieb zu erhöhen. Stellvertretend dazu ist die ASR A 2.1 zu nennen. Diese definiert u. a. Höhenbereiche für Geländer, um Gefahrenbereiche zu sichern und ein Abstürzen zu verhindern. Um die alltäglich anfallenden Arbeiten oder auch Reparaturen jederzeit durchführen zu können, bedarf es ausreichende Beleuchtung in den Gebäuden. Hierzu schreibt ASR A 3.4 bestimmte Beleuchtungsstärken vor, die in der Planung zu berücksichtigen sind.

Außerdem gibt der Verein Deutscher Ingenieure (VDI) verschiedene Richtlinien zu Qualitätsstandards heraus. Einzelne Aspekte sind hinsichtlich des Nutzerkomforts für die geplanten Bauten relevant. Beispielsweise weist VDI 6000 Blatt 1 auf **Montagehöhen** in sanitären Einrichtungen hin. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse können nicht nur in den betreffenden Räumen Anwendung finden, sondern auch auf andere Bereiche mit ähnlichen Arbeitshöhen übertragen werden.

2.2. Abschlussbauwerke für Brunnen

Abschlussbauwerke bei der Wasserförderung besitzen bei aller Individualität der Anlagen stets dieselben Aufgaben. Das Gebäude an sich nimmt die verschiedenen Betriebskomponenten wie z. B. die Rohrleitungen, Armaturen, elektrische Anlagen sowie den Brunnenkopf im Inneren auf. Dies erfolgt unabhängig davon, ob das Brunnenhaus unter- oder oberirdisch gebaut wird. Theoretisch besteht die Möglichkeit, den Brunnen auch außerhalb des Gebäudes zu errichten. Dennoch wird von dieser Bauweise abgeraten, weil hierbei der Schutz nur in geringerem Maße gewährleistet werden kann. Das Abschlussbauwerk schützt sowohl den Brunnen als auch die Anlagenkomponenten primär vor Witterungseinflüssen und unbefugtem Zutritt. Aus diesem Grund schreibt die Obere Wasserbehörde Zanjans die Errichtung eines Zauns um die Bauten der örtlichen Wasserversorgung herum vor. Das Gebäude ist entweder mit einer Einstiegs Luke über das Dach oder über eine Tür zu betreten. Dabei ist jedoch darauf zu achten, dass der Zugang für ordnungsgemäße Reparatur-, Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten ungehindert möglich sein muss. Einen weiteren Sicherheitsaspekt stellt der bessere Brunnenabschluss infolge der Überbauung dar. Dadurch reduziert sich die Gefahr der Verunreinigung des geförderten Grundwassers durch Fremdstoffe und deren potenziell schädlichen Einfluss auf das Wasser. In dem vorliegenden Projekt soll außerdem eine hochwassersichere Bauweise aufgrund der lokalen Besonderheiten des Brunnenstandortes Anwendung finden.

Das Konzept basiert auf dem Regelwerk DVGW W 122 (A). Abbildung 1 und Abbildung 2 stellen zwei verschiedene Bauweisen dar, welche in Kombination im Dorf Hamzehloo umgesetzt werden sollen. Die einzelnen Komponenten, welche für den Bau wichtig sind, werden im Folgenden beschrieben.

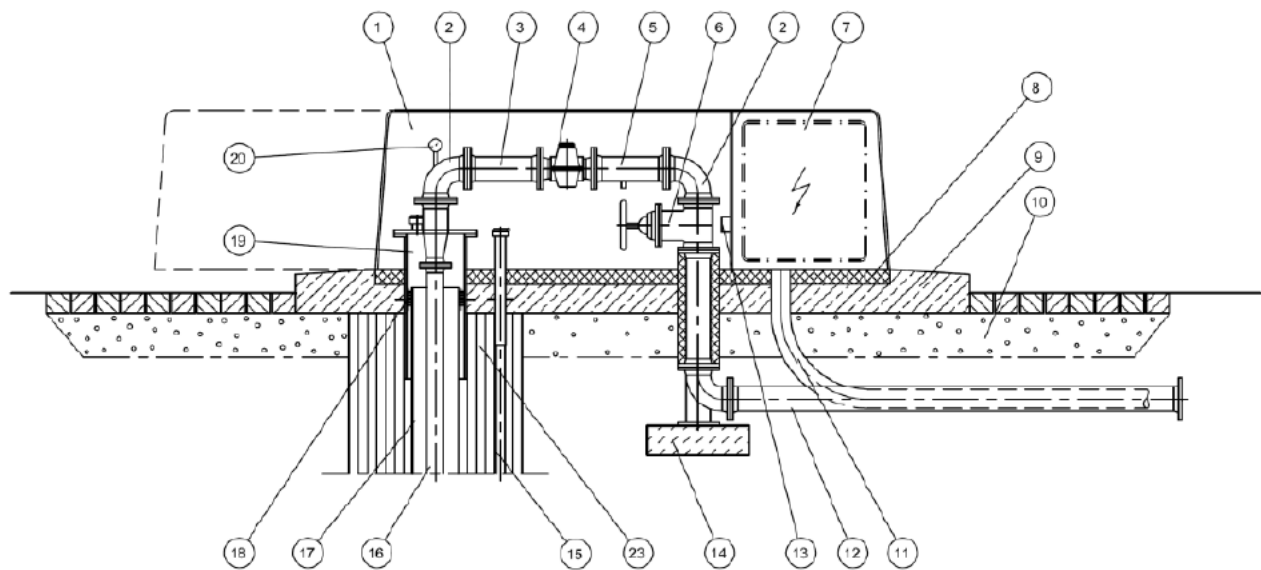


Abbildung 1: Abschlussbauwerk in Sonderbauweise nach DVGW W 122 (A)

Das Brunnenhaus wird wie in Abbildung 1 oberirdisch errichtet. Dies vereinfacht den Bau mit den lokal zur Verfügung stehenden Geräten. Außerdem liegt der Brunnen inmitten eines überflutungsgefährdeten Gebietes. Dementsprechend bedarf es die Umsetzung von Maßnahmen im Bereich Hochwasserschutz. Eine einfache Maßnahme gegen die Fluten ist ein Schutzwall um das Gebäude. Bepflanzung und Steine schützen den Wall zusätzlich, sodass wenig Erde witterungsbedingt abgetragen und die Standsicherheit während des Hochwasserereignisses erhöht wird. Um die Statik der Brunnenstube sicherzustellen, muss die zusätzliche Erdlast und der damit einhergehende Druck Berücksichtigung finden.

Das Regelwerk setzt bei der Umsetzung insbesondere auf wasserundurchlässigen Beton. Sowohl das Fundament (9 bzw. 21), als auch die Wände und Decke bestehen aus diesem Material. Zudem muss das Bauwerk Abdichtungen (6) an allen Öffnungen sowie an erdberührten Bauteilen aufweisen, um das Eindringen von Wasser zu verhindern und so Schäden an der Elektrotechnik zu vermeiden (siehe Abbildung 2).

Der Zutritt zum Gebäude erfolgt über einen ebenerdigen Eingang. Des Weiteren verfügt das Gebäude über eine Montageluke (2). Die Öffnung muss sich direkt oberhalb des Brunnens befinden. Denn die Pumpe, welche im Brunnen Grundwasser fördert, muss im Falle eines Defekts oder zu Wartungszwecken jederzeit aus dem Brunnen gezogen werden können. Hierbei gilt es auch, auf die Standsicherheit zu achten. Auftretende Spitzenlasten beinhalten neben dauerhaft einwirkenden Kräften zudem die Pumpe mitsamt dem Steigrohr, zusätzliche Personen und gegebenenfalls Geräte zum Anheben der Pumpe. Entsprechende Zusatzlasten müssen in den Lastannahmen berücksichtigt werden.

Die Steuerungstechnik der Tauchmotorpumpe, die im Normalzustand der Anlage im Brunnen abgesenkt und mit einem Stahlseil fixiert ist, befindet sich in einem Schaltschrank (27). Dieser sollte erhöht angebracht sein, um Wasserschäden infolge von Spritzwasser auszuschließen. Neben der elektrischen Steuerung der Pumpe enthält der Schaltschrank außerdem alle Sicherungen der Anlagen- und Gebäudetechnik.

Die generelle Stromversorgung kann entweder oberirdisch mittels Strommasten oder unterirdisch per Erdkabel (7) erfolgen. Weil die Distanz zwischen Brunnenhaus und Hauptstromleitung gering ausfällt, ist eine erdverlegte Stromversorgung zu bevorzugen. Abbildung 1 zeigt eine solch mögliche

Umsetzung. Die Erdkabel können bestenfalls mit den Rohrleitungen zusammen in der gleichen Trasse verlegt werden, um Kosten und Arbeitszeit zu reduzieren.

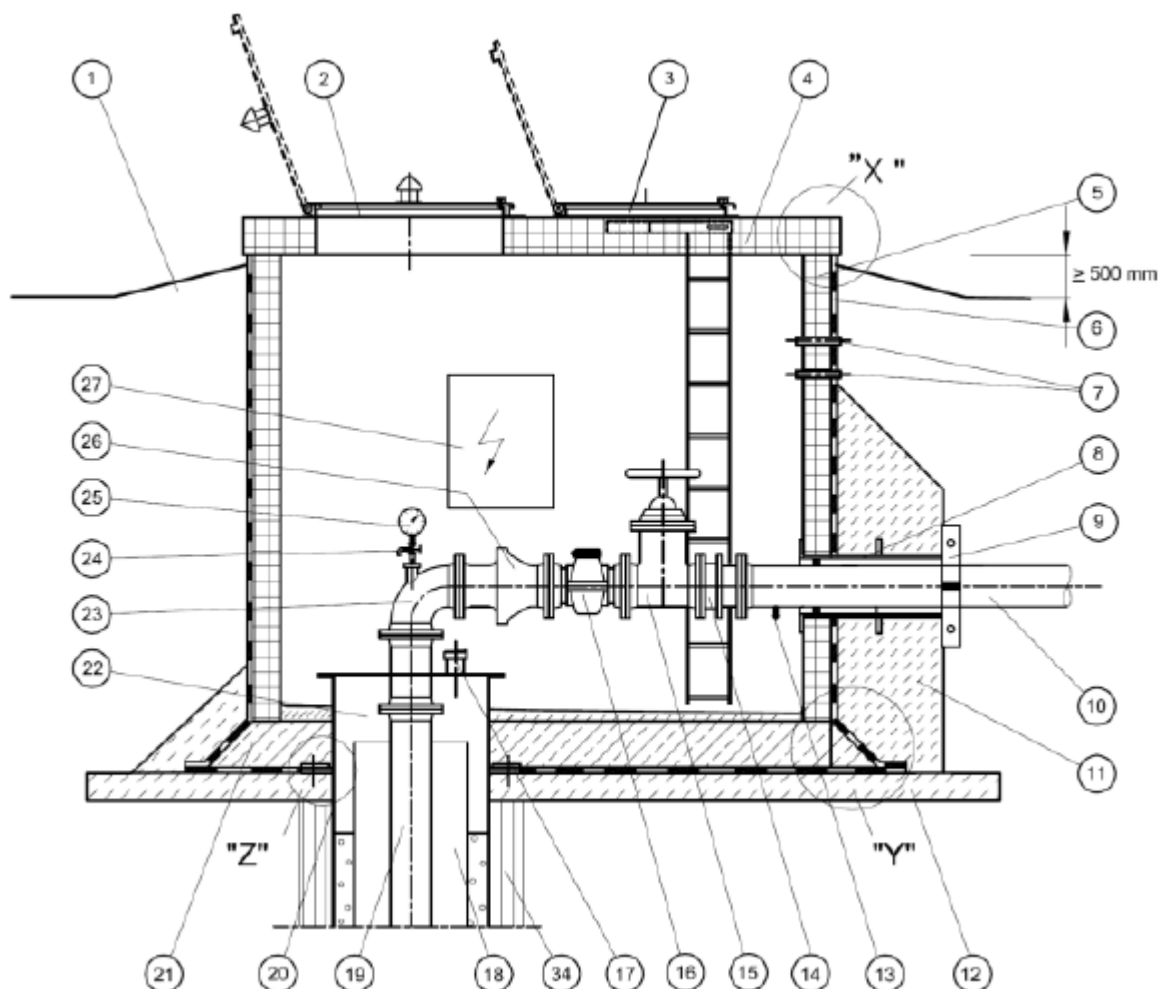


Abbildung 2: Abschlussbauwerk für Vertikalfilterbrunnen nach DVGW W 122 (A)

Wie in Abbildung 2 zu sehen, befindet sich die Steigleitung (19) im Inneren des Brunnenrohres. Der Brunnenkopf (22) bildet den Übergang zum sichtbaren Teil der Rohre im Gebäude. Dort schließt unmittelbar der Flanschbogen (23) an. An diesem ist ein Manometer (25) in Kombination mit einem Entlüftungshahn (24) montiert. So fällt der Lufteintritt zum Transportnetz minimal aus. Mit Hilfe des Manometers lässt sich der Förderdruck der Pumpe kontinuierlich überwachen. Im weiteren Verlauf ist ein Rückschlagventil (26) in die Leitung integriert. Dieses stellt sicher, dass die Wassersäule nicht zurückfließt, sobald die Pumpe abgeschaltet wurde. Somit wird die eingesetzte Pumpe in zweierlei Hinsicht geschont, wodurch sich die Nutzungsdauer erhöht. Denn zum einen muss die Wassersäule nicht bei jedem Anfahren neu aufgebaut werden und zum anderen wird so ausgeschlossen, dass das Wasser durch die Pumpe in den Brunnen zurückfließt und dadurch eventuell Schäden entstehen. Mit dem Absperrschieber (15) ist eine weitere Armatur in dem Abschnitt verbaut. Dieser wird während Wartungs- und Reparaturarbeiten geschlossen. Dies ermöglicht beispielsweise die Pumpe ohne großen Aufwand zu inspizieren. Des Weiteren durchfließt das geförderte Wasser einen Wasserzähler (16). Die Werte legen die Grundlage für einen Vergleich zwischen den Wassermengen, die im Reservoir und der Aufbereitungsanlage ankommen. Bei einer regelmäßigen Dokumentation der Daten können Wasserverluste infolge von Rohrleitungsschäden frühzeitig erkannt werden.

Die beiden Abschlussbauwerke unterscheiden sich auch hinsichtlich der Rohrdurchführungen bzw. der Verlegetiefe im Übergangsbereich außen- und innenliegender Leitungen. Trotz der eingeschränkten Platzverhältnisse ist die Lösung der Sonderbauweise diesbezüglich zu präferieren, weil in diesem

Fall die Wasserleitungen in Kombination mit einem Pumpensumpf direkt unterhalb der Frostgrenze verlegt werden können. Außerdem werden die Rohre auch dann nicht freigelegt, falls Wassermassen den Schutzwall wegschmelzen.

2.3. Umkehrosmose als Kernelement der Wasseraufbereitung

Das Konzept der Wasseraufbereitung basiert auf zwei verschiedenen Hauptbestandteilen. Zum einen durchströmt das Rohwasser zunächst eine Vorreinigung. Diese besteht aus einem kombinierten Sand-Aktivkohlefilter und zwei Mikrofiltern. Hierbei liegt der Fokus hauptsächlich auf Parametern, die den Verschleiß der Anlage erhöhen und infolgedessen die Lebensdauer nachfolgender Komponenten negativ beeinflussen. Zum anderen bildet die Umkehrosmosemembran das Herzstück der Anlage. Umkehrosmosemembranen halten Wasserinhaltsstoffe wie Natrium, Chlorid, Nitrat, Calcium, Sulfat, Magnesium oder auch gelöste organische Stoffe (DOC) nahezu vollständig zurück (DVGW 2009). Dementsprechend kommen Umkehrosmoseanlagen global betrachtet meistens bei der Entsalzung von Meer- und Brackwasser zum Einsatz.

Membranverfahren beruhen immer auf einer Trenntechnik, bei der die Membran als elementarer Bestandteil Stoffströme unterschiedlichster Art aufteilt. Auch bei der Umkehrosmose definiert die Porengröße der Membran, welche Wasserinhaltsstoffe zurückgehalten werden. Hierbei ist lediglich der Durchmesser der Partikel entscheidend. Nur wenn dieser geringer als der Porendurchmesser der Membran ist, gelangt das Partikel in das Reinwasser. Infolge der Aufkonzentration von Salzen auf Seiten des Rohwassers, muss die Umkehrosmoseanlage mit sehr hohen Drücken arbeiten. Diese setzen Hochdruckpumpen unmittelbar vor Durchfließen der Membran um. Sobald ausreichend Druck aufgebaut wurde und der künstlich erzeugte Druck den osmotischen Druck des Wassers übersteigt, durchqueren die Wassermoleküle die Membran, während größere Partikel auf der ursprünglichen Seite verbleiben (Melin und Rautenbach 2007).

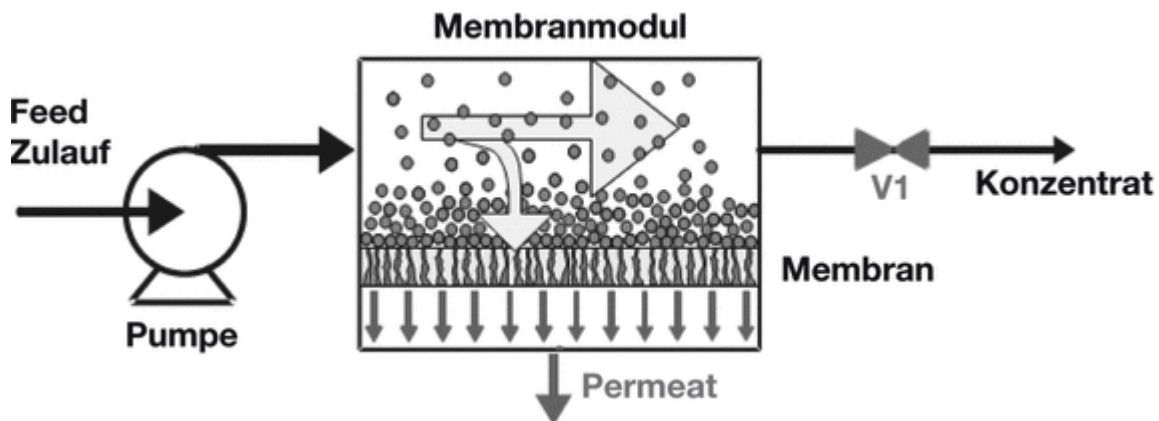


Abbildung 3: Prinzipieller Aufbau eines Membranmoduls (DVGW 2009)

Abbildung 3 verdeutlicht das zugrundeliegende Prinzip der Umkehrosmose. Die meisten Module werden als sog. 3-End-Module betrieben. Diese basieren auf einem Eingangsstrom und zwei Ausgangsströmen. Als Feed wird der Zulauf in die Membran bezeichnet. Der Teilstrom, welcher die Membran aufgrund des erzeugten Drucks durchquert, stellt das Permeat dar. Der Begriff Filtrat ist äquivalent zu verwenden. Das Retentat, auch Konzentrat genannt, enthält die aufkonzentrierten Stoffe, die nicht die Membran durchfließen können. Aus betrieblichen Gründen ist es vorteilhaft, den Retentatstrom während des Filtrationsprozesses mit Hilfe eines Ventils temporär zu schließen. Dies führt zu einem sog. Dead-End-Betrieb. Überströmt der Zulauf stattdessen die Membran quer zur Filtrationsrichtung, liegt ein Cross-Flow-Betrieb vor. Die Ausbeute spiegelt das Verhältnis zwischen Permeat und Feed wider. Diese beträgt bei der Umkehrosmose im Allgemeinen rund 40 %. Aus diesem Grund muss für die Bereitstellung von Trinkwasser entsprechend mehr Grundwasser gefördert werden.

Weil die unterschiedlichen Ströme wichtige Bestandteile der detaillierten Modellierung im späteren Verlauf der Arbeit darstellen, werden diese zum besseren Verständnis auch in Form eines R&I-Fließbildes des ursprünglichen Konzepts erläutert (siehe Abbildung 4).

Abbildung 4: R&I-Fließbild der Aufbereitungsanlage (Eichhorn 2020)

3. Methodik

Um die Thesis wissenschaftlich fundiert zu erarbeiten, erfolgte vorab eine umfangreiche, systematische Literaturrecherche. Die Qualität der Literatur wurde zudem auf Aktualität, Relevanz und Plausibilität hin geprüft. Neben Fachliteratur schloss die Untersuchung auch relevante Normen und DVGW-Arbeitsblätter mit ein, welche bereits in Kapitel 2.1 knapp erläutert wurden.

3.1. Bestandsaufnahme

Doch insbesondere für die Bestandsaufnahme sind die beiden zweiwöchigen Aufenthalte in Iran im Juni und Oktober des Jahres 2022 von großer Bedeutung. Die während der Kampagnen neu gewonnenen Erkenntnisse bilden nicht nur die Grundlage des aktuellen IST-Zustandes, sondern gewähren auch einen eingehenden Vergleich mit der Bestandsaufnahme aus dem Jahre 2019. Abweichungen vom ursprünglichen Konzept und Veränderungen innerhalb des Dorfes während dieser drei Jahre werden im Anschluss ausgiebig beleuchtet und herausgearbeitet.

Ein weiterer positiver Aspekt der Aufenthalte vor Ort stellt der direkte Austausch mit allen Projektbeteiligten dar. Aufgrund der Präsenz finden persönliche Treffen und Befragungen mit den unterschiedlichen Interessensgruppen statt. Hierbei werden, wie die Erfahrungen bestätigen, wesentlich bessere Fortschritte und Ergebnisse erzielt, als wenn die Gespräche online geführt würden. Neben den Befragungen der Projektbeteiligten erfolgte auch die Durchführung von Pumpversuchen. Aufgrund dessen wird nachfolgend sowohl der Aufbau als auch die Durchführung und Auswertung im Allgemeinen erläutert.

3.1.1. Befragungen vor Ort

Daten von Dorfbewohnern

Für einen detaillierten Einblick in die Dorfgemeinschaft wurden mehrere Gespräche mit dem Dorfoberhaupt geführt. Dieser vertritt stellvertretend für alle Bewohner Hamzehloos deren Meinung den deutschen Projektpartnern gegenüber. Die Art der Fragestellung gewährleistete eine Rahmenstruktur für das Gespräch. Neben konkreten Fragen, wie beispielsweise zur Anzahl permanenter Bewohner oder auch zur derzeitigen Trinkwasserbeschaffung, erlaubten zahlreiche offene Fragen eine flexible Gesprächsführung und einen dynamischen Verlauf. Der Fokus lag jedoch nicht nur auf dem Gewinn neuer Informationen, sondern diente auch dem Zweck, ein Stimmungsbild der lokalen Bevölkerung einzuholen. Des Weiteren sollen Anliegen und Wünsche der Dorfbewohner gehört und wenn möglich berücksichtigt werden, sofern diese nicht mit den Projektzielen konkurrieren. Zum Beispiel äußerte der Dorfvorstand den Wunsch, die Grabung der Trasse und Verlegung der Rohrleitungen vor Beginn der Feldbewirtschaftung abzuschließen. Da dem keine projektspezifischen Gründe entgegenstünden und der rasch voranschreitende Bau ausdrücklich erwünscht ist, konnten die Bauarbeiten zu aller Zufriedenheit frühzeitig umgesetzt werden. Außerdem verfügen die Dorfbewohner über spezielle Fachexpertise der lokalen Umgebung. Dieser Erfahrungsschatz ist essenziell für die erfolgreiche sowie nachhaltige Umsetzung des Projektes. Die Einheimischen besitzen fundierte Kenntnisse der Veränderung des lokalen Klimas über Jahrzehnte hinweg. Sie kennen deren Auswirkungen auf die örtlichen Flüsse und passen sich dementsprechend an die neuen Umstände an. Auch können sie Aussagen bezüglich der Hochwasserereignisse treffen sowie maximale Pegelstände anhand baulicher Erkennungspunkte bestimmen. Diese Erfahrungswerte dienen als Grundlage für die Auslegung des Hochwasserschutzes des Brunnenhauses.

Daten von behördlichen Einrichtungen

Die lokale Kulturbehörde bekräftigte ihr Interesse und die Unterstützung des Vorhabens gegenüber den Projektbeteiligten und sicherte auch im weiteren Verlauf Mithilfe zu. Für die Umsetzung ist

jedoch v. a. die Obere Wasserbehörde ein entscheidender Akteur. Diese stellt die Genehmigung des Brunnens bzw. dessen Nutzung aus. Aufgrund der Zeitspanne von drei Jahren seit den letzten Pumpversuchen, stellte die Behörde die Bedingung, dass aktuelle Pumpversuche sowie neue Wasserproben im Labor analysiert werden müssen. Wenn der Pumpversuch nicht positiv ausfällt, kann auch keine Genehmigung für den Betrieb der Pumpe ausgestellt werden. Um sicherzustellen, dass die Daten korrekt aufgenommen werden, ist die Untere Wasserbehörde zu unterrichten. Diese überwacht anschließend den Pumpversuch sowie die Probenahme. Außerdem stellt die Behörde auch Genehmigungen zur Brunnenvertiefung aus. Hier ist entscheidend, ob es sich dabei um eine Handgrabung oder um eine Bohrung handelt. Des Weiteren gibt die Wasserbehörde zum Teil Vorgaben zum Ausbau der Wasserinfrastruktur. Neben der Einhaltung der Frostgrenze, die aus betrieblichen Gründen eingehalten werden muss, liegen auch standardisierte Bauformen für das Reservoir und das Brunnenhaus vor. Weil jedoch zum Teil größere Abweichungen aufgrund der lokalen Besonderheiten bestehen, wurde bei der Realisierung des Projekts ein größerer Spielraum gewährt und die Bauweise mit alternativen Konzepten befürwortet.

Neben den baulichen und betrieblichen Bedingungen gab der Diskurs ebenfalls Aufschluss über die organisatorischen Möglichkeiten in der Wasserversorgung. Normalerweise übernimmt die Behörde Reparaturen an der Wasserinfrastruktur gegen eine Wassergebühr, sofern mehr als 25 Familien im Dorf leben. In Hamzehloo wohnen allerdings zurzeit nur fünf verschiedene Familien. Die Dorfbewohner würden allerdings befürworten, die Gebühr, welche zusätzlich zum Trinkwasserpreis anfällt, zu zahlen, um so nicht verantwortlich für entstehende Wartungs- und Reparaturkosten zu sein. Zudem schlägt die Wasserbehörde vor, dass das Trinkwasser zunächst zu einem niedrigen Einstiegspreis angeboten werden soll, da bereits einige Materialien im Voraus besorgt werden konnten. So können sich die Bewohner an das neue System gewöhnen, bevor der Preis in einem angemessenen Rahmen erhöht wird. Außerdem schätzt die Behörde das Potenzial der Trinkwasseraufbereitungsanlage sehr hoch ein. Nach deren Vermutungen zapfen sich zukünftig drei umliegende Dörfer in Hamzehloo Trinkwasser. Dies entsprächen 500 bis 600 Personen. Die Dorfbewohner liegen bei ihren Schätzungen deutlich konservativer und bei einer realistischeren Personenanzahl von maximal 200.

Des Weiteren führte ein Labor die Wasseranalysen durch. Die Ergebnisse hierzu werden in Kapitel 4.3 ausführlich betrachtet. Zudem stellten die Mitarbeitenden den Projektpartnern iranische Standards bezüglich der Grenzwerte der Wasserparameter zur Verfügung.

Daten von lokalen Unternehmen

Für die Umsetzung des Projektes bedarf es der Mithilfe einiger lokaler Firmen. Ziel dabei ist es, gemeinsam das bestmögliche und sinnvollste Resultat zu erzielen. Dafür werden die Unternehmen in zwei Gruppen gegliedert. Auf der einen Seite stehen Akteure, die primär für die technische Ausstattung zuständig sind. Darunter zählen u. a. der Pumpenladen in Zanzan und der Verkäufer der Aufbereitungsanlage aus Isfahan. Hier fokussiert sich die Zusammenarbeit auf den Wünschen der deutschen Projektpartner. Denn es besteht bereits ein funktionierendes Konzept inklusive der Detailbeschreibungen der Vorzugsvariante. Somit steht hier bei der Zusammenarbeit nicht die Frage im Mittelpunkt, wie das Projekt realisiert werden kann, sondern welche Produkte dauerhaft auf dem lokalen Markt verfügbar sind. Im Falle eines Defekts müssen Ersatzteile innerhalb kurzer Zeit beschafft werden, um die Ausfallzeiten möglichst gering zu halten.

Auf der anderen Seite sind Unternehmen zu nennen, die den tatsächlichen Bau ausführen. Darunter fallen die Brunnenbauer und Bauunternehmer, welche die Trasse graben und die Gebäude errichten. Bei dieser Zusammenarbeit liegt der Fokus auf gegenseitiges Lernen und Finden der besten Lösung, bei der beide Seiten zu Kompromissen bereit sein müssen. Grundsätzlich soll vornehmlich die lokale Bauweise umgesetzt werden. Die Berücksichtigung deutscher Standards ist hinsichtlich der Sicherheit und der teils besonderen Projektbedingungen (z. B. Hochwasserereignis) im Sinne der Nachhaltigkeit sowie der langfristigen Nutzung sinnvoll. In gemeinsamen Besprechungen gilt es die Vor- und Nach-

teile abzuwägen und realistische Lösungen zu finden, die vor Ort mit den verfügbaren Verfahren, Methoden und Materialien umsetzbar sind.

3.1.2. Pumpversuche nach DVGW W 111

Allgemeines

Pumpversuche stellen ein in situ Verfahren dar, bei dem aus mindestens einem Brunnen Grundwasser entnommen wird. Die Änderungen des Wasserspiegels sowie die jeweilige Fördermenge lassen Rückschlüsse hinsichtlich der geohydraulischen Situation zu. Durch die Dokumentation der Temperatur und Beschaffenheit des geförderten Grundwassers gewinnt der Durchführende relevante Informationen bezüglich der hydrochemischen Voraussetzungen. Alle Eigenschaften spielen für den späteren Betrieb des Brunnens eine entscheidende Rolle. „Ziel eines Pumpversuches ist es, die Leistung [des Brunnens], die wasserleitenden und wasserspeichernden Eigenschaften des Grundwasserleiters sowie die Beschaffenheit des Grundwassers zu bestimmen“ (DVGW W 111, S. 8).

Es gibt verschiedene Arten von Pumpversuchen. Brunnentests dienen der Funktionskontrolle bereits fertiggestellter Förderanlagen. Gleichzeitig ermöglichen diese aber auch eine Vorerkundung und grundsätzliche Einschätzung zur Planung eines Brunnens. Hierbei lässt sich auch das Einzugsgebiet der Brunnenanlage abschätzen. In Hamzehloo erfolgten die primären Felduntersuchungen bereits im März 2019. Die Pumpversuche bewiesen, dass die betrachteten Brunnen grundsätzlich in der Lage sind, einen ausreichenden Durchfluss für die Versorgung des Dorfes und der geplanten Einrichtungen bereitzustellen. Bei Langzeitpumpversuchen konzentriert sich dagegen die Datenerhebung auf die Analyse hydraulischer Eigenschaften und der Ergiebigkeit des Aquifers. Diese sollen ausschließen, dass die Brunnen lediglich durch kleine Wasserlinsen im Untergrund gespeist werden. Optimalerweise bieten die langfristig angelegten Feldexperimente auch Schlussfolgerungen bezüglich der ökologischen Auswirkungen infolge der Wasserentnahme.

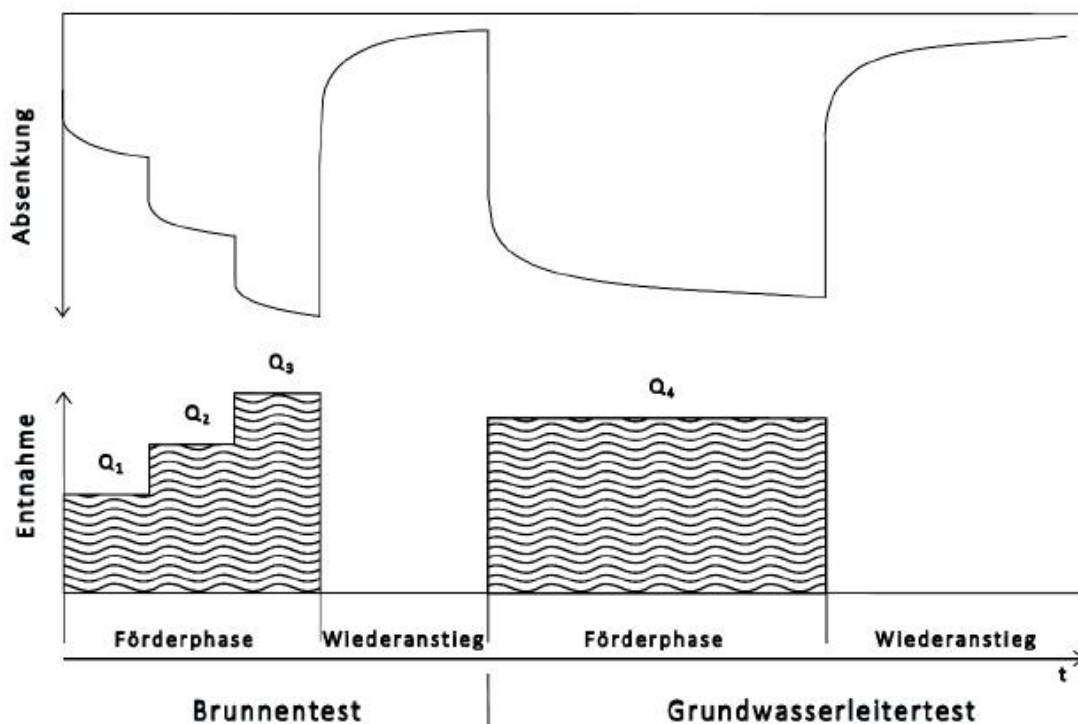


Abbildung 5: Schema einer Kombination von Brunnen- und Grundwasserleitertest (DVGW W 111)

Abbildung 5 zeigt den Unterschied zwischen der Langzeit- und Kurzzeituntersuchung. Da in diesem Fall beide Pumpversuche in Kombination miteinander stattfinden, muss auf eine ausreichende Aufspiegelung des Wasserstandes im Brunnen geachtet werden, um die Ergebnisse nicht zu verfälschen. Generell können die beiden Pumpversuche auch völlig unabhängig voneinander durch-

geführt werden. Die Absenkung ergibt sich aus der Höhendifferenz zwischen dem abgesenkten Grundwasserspiegel im laufenden Betrieb und dem Ruhewasserspiegel vor Beginn des Pumpversuchs. Die Entnahmemenge bzw. Förderrate Q ist ein Maß der geförderten Wassermenge pro Zeiteinheit.

In Abbildung 5 ist auch zu sehen, dass im ersten Abschnitt ein gestufter Pumpversuch durchgeführt wird. Dabei kommen mehrere, vorab festgelegte Förderraten zum Einsatz. Sobald ein konstanter Wasserspiegel erreicht wird, folgt die nächste Stufe. Der quasistationäre Zustand während der Grundwasserentnahme wird auch als Beharrung bezeichnet. Typischerweise fällt der Wasserstand zu Beginn jeder Stufe deutlich stärker ab als im weiteren Verlauf der jeweiligen Phase. Dieser Effekt resultiert aus den unterschiedlichen Höhenunterschieden zwischen Aquifer und abgesenktem Wasserspiegel im Brunnen. Anfangs fällt die Zuflussgeschwindigkeit niedrig aus, sodass die Absenkung nicht unmittelbar ausgeglichen werden kann. Dadurch entsteht das Bild eines träge reagierenden Aquifers. Während der Regenerationsphase dreht sich dieser Effekt um. Der Grundwasserleitertest besteht dagegen in der Regel nur aus einer gleichbleibenden Entnahmemenge. Theoretisch können Pumpversuche dieser Art über mehrere Jahre hinweg laufen und Ergebnisse aufzeichnen.

Durchführung

Für einen Pumpversuch müssen drei Arbeitsschritte beachtet werden: erstens die Planung des Experiments, zweitens die konkrete Durchführung und drittens die Auswertung. Das Entwerfen eines Versuchsprogramms ist Teil der Vorbereitung. Dieses umfasst nicht nur die zu beprobenden Brunnen bzw. Grundwassermessstellen, sondern auch welche Messwerte (Wasserstand, Niederschläge, Luftdruck) dokumentiert und mit welcher Messmethode ermittelt werden. Ebenfalls gilt es den Versuchszeitraum festzulegen. Darüber hinaus müssen die Durchführenden alle technischen Geräte zusammenstellen, auf Funktionstüchtigkeit prüfen und die Energieversorgung sicherstellen. Während des laufenden Pumpversuchs muss der kontinuierliche Betrieb sowohl der Pumpe als auch der Messtechnik sichergestellt sein. Messergebnisse sollen dabei so dokumentiert werden, dass sie für Andere nachvollziehbar bleiben. Geschultes Personal organisiert die Probenahme und setzt diese um, sofern diese notwendig oder gewünscht ist.

Bevor der Pumpversuch startet, erfolgt die Messung des Ruhewasserspiegels im Brunnen. Im Laufe des Experiments werden weitere Messungen durchgeführt. Die Messintervalle sind jedoch abhängig von der Dauer bzw. der Phase des Versuchs. Denn zu Beginn sinkt der Wasserspiegel, wie bereits beschrieben, schneller ab. Deshalb müssen die Messungen während der ersten Minuten deutlich häufiger durchgeführt werden als in der Phase nahe des Beharrungszustandes.

Zur Messung des Wasserstandes kommen zwei Verfahren zum Einsatz. Zum einen erfolgen die Messungen per Datenlogger. Dieses Messinstrument zeichnet in vorab definierten Zeitintervallen den Druck mit Hilfe eines Sensors auf. Der CTD-Diver misst die Höhe der Wassersäule, indem der Wasserdruck oberhalb des Sensors bestimmt wird. Die Daten speichert der Diver intern und können nach Beendigung der Messung ausgelesen werden. Um Veränderungen im Atmosphärendruck zu dokumentieren, erfasst ein zweiter Datenlogger (Baro-Diver) die Werte des Luftdrucks. Der CTD-Diver kann nicht nur die Wassersäule ermitteln, sondern speichert auch Werte zur Temperatur und elektrischen Leitfähigkeit. Aufgrund der lokalen Bedingungen und des hohen Salzgehaltes im Grundwasser stehen nicht alle Arten von Datenloggern zur Verfügung. Der eingesetzte CTD-Diver besteht jedoch aus Keramik, sodass dieser auch in Brack- und Meerwasser korrosionsbeständig ist (Schlumberger Water Services 2014). Der CTD-Diver ist in den Brunnen abzusenken, bis dieser vollständig von Wasser überdeckt ist. Für optimale Messergebnisse sollte sichergestellt werden, dass der Datenlogger auch während der Absenkung von einer Wassersäule bedeckt bleibt. Im Gegensatz dazu verbleibt der Baro-Diver an der Oberfläche. Auch ist nur ein Baro-Diver im Umkreis von 15 km notwendig, wenn mehrere Brunnen gleichzeitig beprobt werden (ebd.). Das Ende der Datenerfassung ist dann erreicht, wenn keine signifikanten Änderungen mehr auftreten und sich die Aufspiegelung annähernd konstant auf dem Niveau des ursprünglichen Ruhewasserspiegels befindet.

Zum anderen erfolgt die Messung des Wasserstandes mit Hilfe eines Lichtlots. Mit dieser Methode kann die Veränderung des Grundwasserspiegels im Brunnen auch von der Oberfläche aus gemessen werden. Dazu lässt der Versuchsdurchführende das beschwerte Ende eines Maßbandes in den Brunnen hinab. Wenn dieses das Wasser berührt, vermittelt dies dem Anwendenden ein optisches oder akustisches Signal. Denn im Maßband sind zwei offene Elektroden integriert, sodass bei Kontakt mit Wasser umgehend der Stromkreis geschlossen wird. Diese Messmethode erfordert jedoch die ständige Präsenz von Personen insbesondere zu Beginn und zum Ende des Pumpversuchs, um aussagekräftige Messwerte während der initialen Absenkung sowie der Aufspiegelung dokumentieren zu können. Aufgrund des hohen Personal- und Zeitaufwands erfolgen die Messungen hauptsächlich mittels der Datenlogger. Jedoch stellen die Messwerte des Lichtlots wichtige Anhaltspunkte zu Kontrollzwecken während des Pumpversuchs dar, weil die Datenlogger erst am Ende ausgelesen werden können. Außerdem reduziert die redundante Messung potenzielle Datenverluste, wenn ein System beispielsweise aus technischen Gründen ausfällt. Abbildung 6 stellt die Messinstrumente der beiden Messverfahren gegenüber.

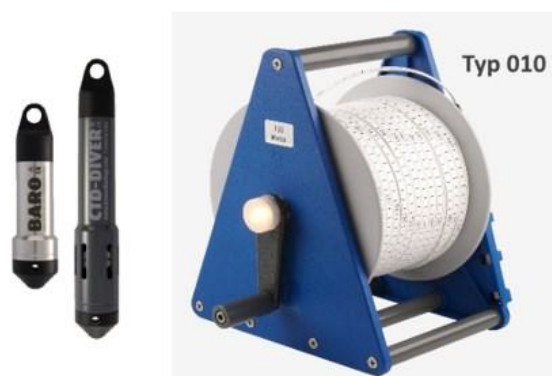


Abbildung 6: Datenlogger (Schlumberger Water Services 2014) und Lichtlot (Hydrotechnik GmbH 2023) zur Bestimmung des Wasserstands

Auswertung

Infolge der konstanten Wasserentnahme bildet sich um den Brunnen, wie in Abbildung 7 zu sehen, ein Absenktrichter. Das bedeutet, dass der Wasserspiegel im Brunneninneren deutlich tiefer liegt als der Wasserspiegel des umgebenden Aquifers. Diese Höhendifferenz ist gleichbedeutend mit dem Unterschied zwischen dem ruhenden und abgesenkten Grundwasserspiegel und stellt die Absenkung dar. Je größer die Absenkung s ist, desto schneller fließt das Grundwasser in Richtung Brunnen nach. Die untenstehende Abbildung 7 verdeutlicht die unterschiedlichen Parameter, die Bestandteil der nachfolgenden Berechnungsformeln sind. Die jeweiligen Herleitungen können Baur et al. (2019) entnommen werden.

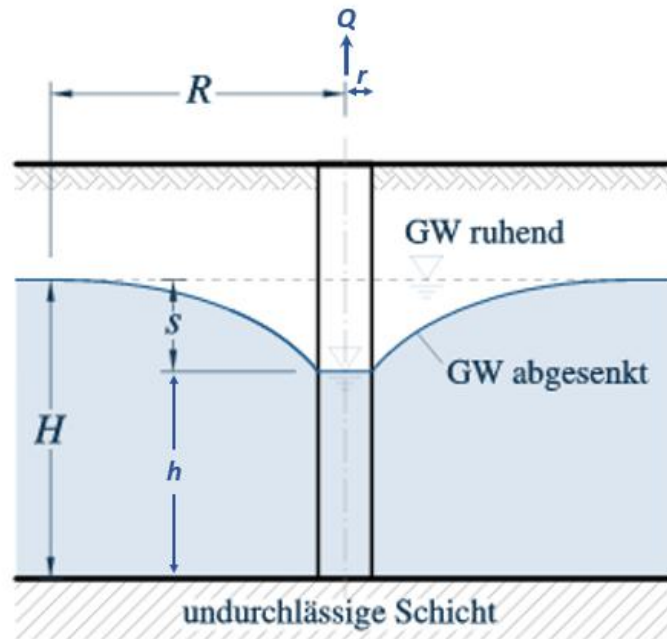


Abbildung 7: Absenkttrichter während des Pumpversuchs (ergänzt nach Bauformel Verlag GmbH 2019)

Die Pumpversuche der Vorerkundung im März 2019 zeigten, dass es sich bei dem Aquifer nahe Hamzehloo um einen ungespannten Grundwasserleiter handelt (Eichhorn 2020). Dementsprechend können die Berechnungsformeln nach diesen Voraussetzungen genutzt und somit die Grundlagen der Brunnenhydraulik bemessen werden.

Zunächst lässt sich der Wasserandrang Q_A im ungespannten Grundwasserleiter nach *Dupuit* mit Gleichung 1 ermitteln.

$$Q_A = \frac{\pi \cdot k_f \cdot (H^2 - h^2)}{\ln\left(\frac{R}{r}\right)} \quad \text{Gleichung 1}$$

mit:

Q_A	Wasserandrang	[m ³ /s]
k_f	Durchlässigkeitsbeiwert	[m/s]
H	Mächtigkeit des Aquifers	[m]
h	Höhe der Wassersäule im Brunnen	[m]
R	Reichweite nach <i>Sichardt</i>	[m]
r	Radius des Brunnens	[m]

Die Reichweite R lässt sich nach *Sichardt* berechnen. Diese stellt den äußersten Einflussbereich von den Absenkungen des Aquifers dar. Die Modellvorstellung impliziert, dass der Zufluss in den Brunnen bzw. der Grundwassermessstelle lediglich vom Rand des Absenkttrichters erfolgt. Überschlägig wird die Reichweite mit Gleichung 2 ermittelt. Die Absenkung ergibt sich aus der Differenz $s = H - h$.

$$R = 3000 \cdot s \cdot \sqrt{k_f} \quad \text{Gleichung 2}$$

mit:

R	Reichweite nach <i>Sichardt</i>	[m]
s	Absenkung	[m]
k_f	Durchlässigkeitsbeiwert	[m/s]

Anschließend ist das Fassungsvermögen Q_F für den ungespannten Grundwasserleiter zu berechnen. Auch hier basiert Gleichung 3 auf den Grundlagen von *Sichardt*.

$$Q_F = 2 \cdot r \cdot \pi \cdot h \cdot v_{max} \quad \text{Gleichung 3}$$

mit:

Q_F	Fassungsvermögen des Brunnens	[m ³ /s]
r	Radius des Brunnens	[m]
h	Höhe der Wassersäule im Brunnen	[m]
v_{max}	Maximale Eintrittsgeschwindigkeit des Wassers	[m/s]

In der Praxis wird bei der Brunnendimensionierung für Grundwasserleiter geringer Mächtigkeit der Ansatz von *Huisman* angewandt. Dieser berechnet die maximale Eintrittsgeschwindigkeit gemäß Gleichung 4.

$$v_{max} = \frac{\sqrt{k_f}}{30} \quad \text{Gleichung 4}$$

mit:

v_{max}	Maximale Eintrittsgeschwindigkeit des Wassers	[m/s]
k_f	Durchlässigkeitsbeiwert	[m/s]

Der Durchlässigkeitsbeiwert k_f des Bodens lässt sich anhand des Quotienten aus Transmissivität T und der Mächtigkeit M des Aquifers bestimmen. *Theis* belegte diesen Zusammenhang für homogene Grundwasserleiter. Allgemein beschreibt die Transmissivität das Integral des Durchlässigkeitsbeiwertes über die Mächtigkeit des Aquifers (DVGW W 111). Während der konstanten Absenkphase kann die Transmissivität nach *Theis und Jacob* anhand Gleichung 5 errechnet werden. Die Formel basiert auf einer grafisch ermittelten Ausgleichsgerade. Hierbei wird für eine logarithmische Dekade die entsprechende Steigung Δs abgelesen (Baur et al. 2019).

$$T = \frac{2,3 \cdot Q}{4 \cdot \pi \cdot \Delta s} \quad \text{Gleichung 5}$$

mit:

T	Transmissivität	[m ² /s]
Q	Förderrate	[m ³ /s]
Δs	Steigung	[m]

Die optimale Brunnenleistung Q_{opt} ist allerdings dann vorhanden, wenn das Fassungsvermögen dem Wasserandrang entspricht. Somit ergibt sich für Q_{opt} folgender Zusammenhang: $Q_F = Q_A$.

3.2. Verwendete Programme

In der vorliegenden Thesis kommen unterschiedliche Softwareapplikationen zum Einsatz. Hierbei handelt es sich um die Programme Revit, InfraWorks und Fusion 360 des Unternehmens Autodesk. In diesem Kapitel werden diese Anwendungen kurz vorgestellt, um einen groben Einblick in die Programme zu geben, bevor diese konkret bei der Modellierung der verschiedenen Bauten genutzt werden. Des Weiteren gibt der folgende Abschnitt Einblick in potenzielle Alternativen, die vor Beginn der Arbeit in Betracht gezogen wurden. Anschließend geht aus dem Vergleich der verschiedenen Softwareanwendungen hervor, wo die Schwächen und Stärken der Programme liegen. Der Vollständigkeit halber wird ebenfalls das Programm DiverOffice dargestellt. Dieses kommt bei der Dokumentation und Auswertung der Datenlogger im Zuge der Pumpversuche zum Einsatz.

Für die Modellierung der Wasserversorgungsinfrastruktur sind die Programme essenziell. Dabei sind diese grundsätzlich in zwei verschiedene Kategorien zu untergliedern. Fusion 360 zählt z. B. zu dem

Bereich CAD (Computer Aided Design). Revit und InfraWorks fallen dagegen in die Sparte des Building Information Modeling (BIM). BIM Softwares entwickelten sich aus den klassischen CAD-Programmen.

Zwischen CAD und BIM bestehen diverse Unterschiede. CAD-Software ermöglicht den Entwurf eines Bauwerks in 2D oder 3D. Dabei basieren die Zeichnungen hauptsächlich auf den geometrischen Grundformen und simpler Grafikelemente (Kauer et al. 2022). Häufig nutzen Architekten oder Designer diese Zeichenprogramme, da Ideen schnell visualisiert, präsentiert und abgeändert werden können. Die bekannteste CAD-Anwendung stellt AutoCAD dar. BIM-Software geht im Gegensatz zu CAD über diese grundlegenden Informationen hinaus. BIM-Modelle liefern über den gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks alle relevanten Informationen (BMVI 2015). Somit erfasst und verwaltet das Modell die Daten des Bauvorhabens von der Planungsphase über die Entwurfs-, Bau- und Betriebsphase bis hin zum Rückbau (Yori et al. 2020). Dementsprechend spiegelt das digitale Modell im besten Fall zu jedem Zeitpunkt den realen Zustand des Gebäudes wider. Außerdem gibt die Software nicht nur Auskunft über die physischen Eigenschaften des Bauwerks, sondern auch bezüglich funktionaler Eigenschaften des Projekts. Beispielsweise können Anwender Informationen hinsichtlich Zeitplan, Meilensteinen, Kosten und Budget im Programm hinterlegen (ebd.). Infolge der konzentrierten Nutzung arbeiten sämtliche Projektbeteiligten gemeinsam an einem Modell, wobei die jeweiligen Zugriffsrechte lediglich auf den eigenen Bereich freigegeben sind. Die Zusammenarbeit in den Bereichen Architektur, Ingenieurbau, Tragwerksplanung, Technische Gebäudeausrüstung bis hin zum Facility-Management fördert eine effizientere Planung des Bauvorhabens, verbessert die Visualisierung des Gesamtbauwerks mit allen Einzelheiten, reduziert Planungsfehler und zielt auf eine kosteneffizientere Projektdurchführung ab (BMVI 2015). Da das BIM-Modell ähnlich wie eine Datenbank genutzt wird, gehen weniger Daten zwischen den einzelnen Akteuren verloren, wodurch sich wiederum die Planungssicherheit erhöht.

3.2.1. Autodesk Revit

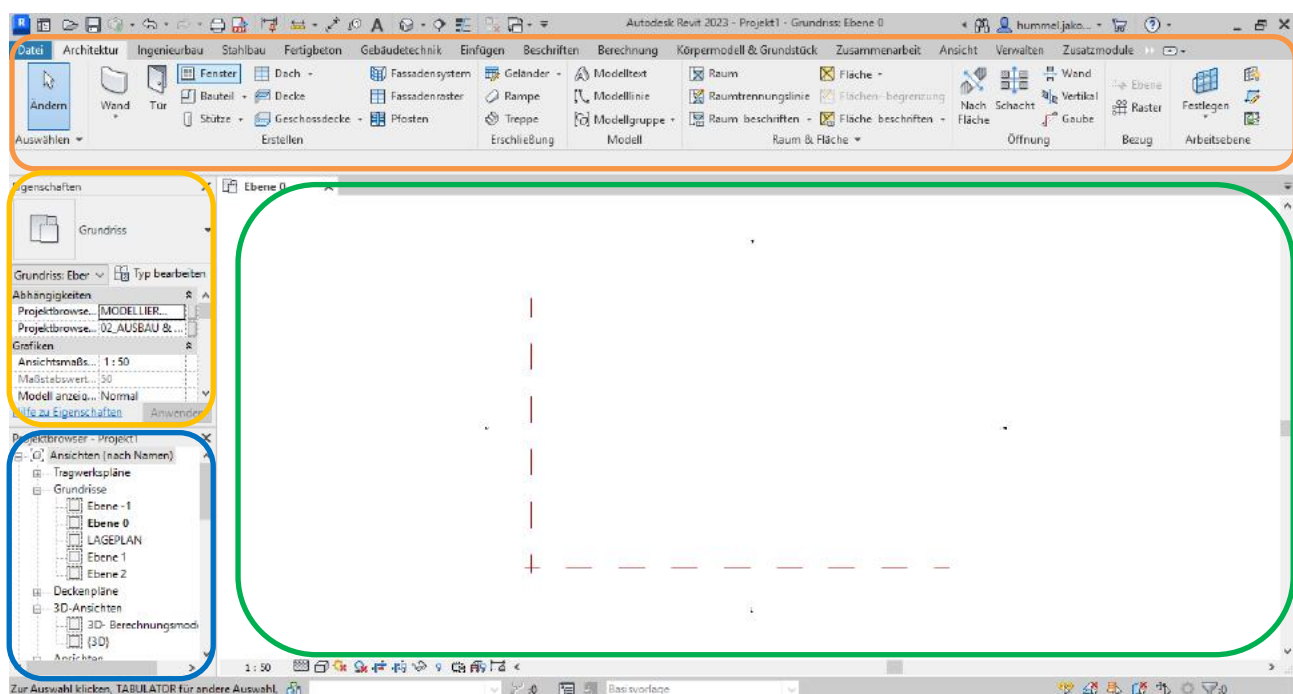


Abbildung 8: Benutzeroberfläche Autodesk Revit (eigene Aufnahme)

Revit ist eine BIM-Software, die primär zum Planen, Entwerfen, Konstruieren und Verwalten eines Gebäudes genutzt wird. Die Benutzeroberfläche untergliedert sich in vier Hauptbereiche, die in Abbildung 8 farblich voneinander abgegrenzt sind. Im grünen Fenster befindet sich der **Zeichen-**

bereich, in dem alle Elemente modelliert und angezeigt werden. Die unterschiedlichen Befehle sind in der **Multifunktionsleiste** hinterlegt. Alle Funktionen verteilen sich dort logisch miteinander verknüpft in den jeweiligen Rubriken. Teilweise öffnen sich weitere Untermenüs in Form von Drop-Down-Listen, wie es z. B. im Bereich Elektrotechnik der Fall ist. Die Reiter sind dabei u. a. in die drei Fachdisziplinen Architektur, Ingenieurbau und Gebäudetechnik unterteilt. Linker Hand bietet es sich an, das Fenster mit **Eigenschaften** zu fixieren. Dadurch kann der Anwender alle wichtigen Informationen bezüglich des ausgewählten Elements auf den ersten Blick erkennen und bei Bedarf unkompliziert ändern. Direkt darunter befindet sich standardmäßig der **Projektbrowser**. Dort sind alle Ansichten, Grundrisse und Schnitte in drei- bzw. zweidimensionaler Form zu finden. Die gewünschte Ansicht lässt sich per Doppelklick aktivieren und öffnet sich direkt in der Zeichenfläche.

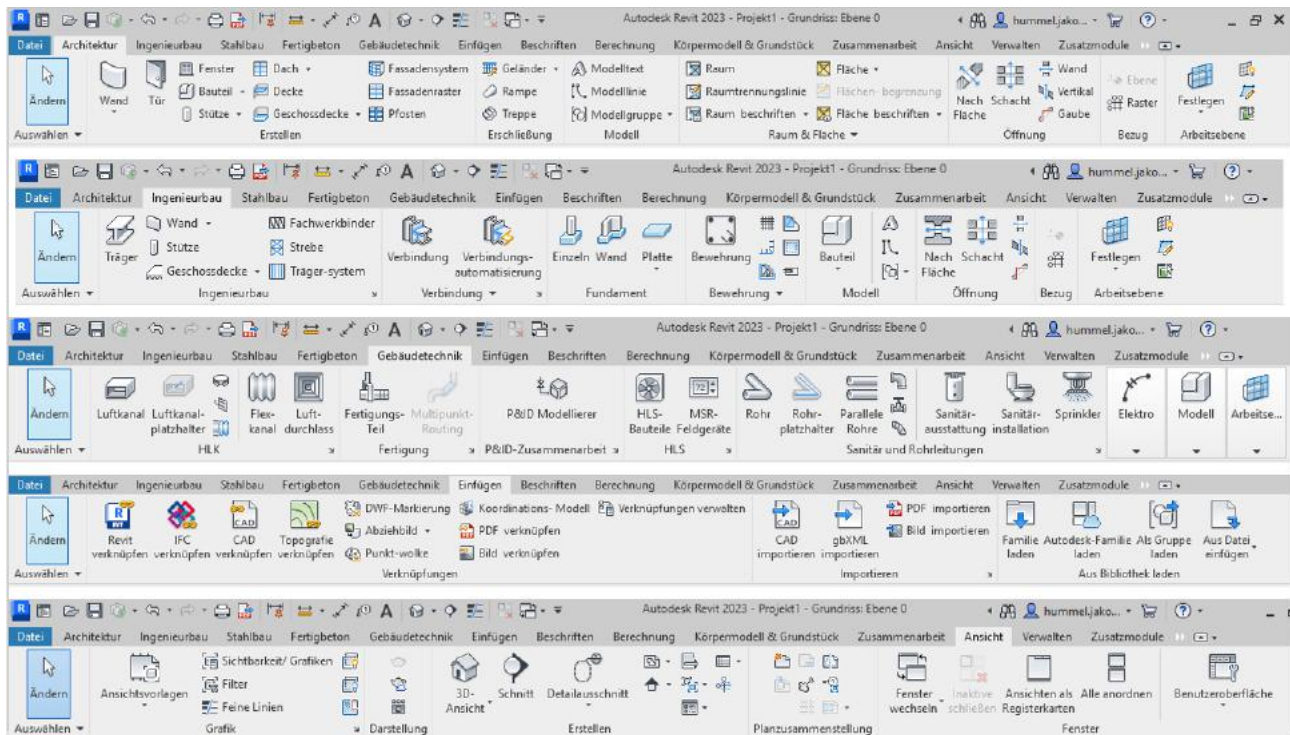


Abbildung 9: Rubriken der Multifunktionsleiste von Revit (eigene Aufnahme)

Die Multifunktionsleiste stellt das Herzstück der Software dar. Aufgrund der Vielfältigkeit ermöglicht es die Anwendung in verschiedenen Fachdisziplinen. Um die bestmögliche Nutzung des Programms sicherzustellen, kann zu Beginn die Projektvorlage nach Präferenzen erstellt werden. Hierzu bietet die Software als Vorlage *Architektur & Ingenieurbau* als vereinfachte Fassung oder Vollversion an, sowie eine Spezialisierung auf Gebäudetechnik. Diese grundlegende Präferenz schließt jedoch die Rubriken der anderen Disziplin nicht vollständig aus. Über den Reiter *Einfügen* können Elemente, Familien und einzelne Bauteile aus der Online-Bibliothek von Autodesk manuell in das Programm geladen werden. Die Fülle an Funktionen (siehe Abbildung 9) ermöglicht eine weitreichende, fachübergreifende Zusammenarbeit.



Abbildung 10: Rubrik *Ändern* im Programm Autodesk Revit (eigene Aufnahme)

Eine Besonderheit stellt das Untermenü *Ändern* dar. Die in Abbildung 10 zu erkennende Zeile unterhalb der Icons passt sich jeweils an das ausgewählte Element an. Dabei erscheinen verschiedene

Aktionen, die umgesetzt werden können. Beispielsweise lässt Revit bei einer Wand den Nutzenden die Wahl, auf welcher Ebene die Wand beginnen und enden soll. Alternativ kann auch die exakte Höhe eingegeben werden. Zudem bietet die Software die Funktion *Kette* an, wodurch die Wände automatisch verbunden werden und im späteren Verlauf auch gemeinsam verschoben bzw. angepasst werden. Diese smarten Verknüpfungen vereinfachen den Erstellungsprozess der Bauten. Funktionen, die bei dem ausgewählten Element nicht angewendet werden können, sind in der Rubrik ausgegraut.

3.2.2. Autodesk InfraWorks

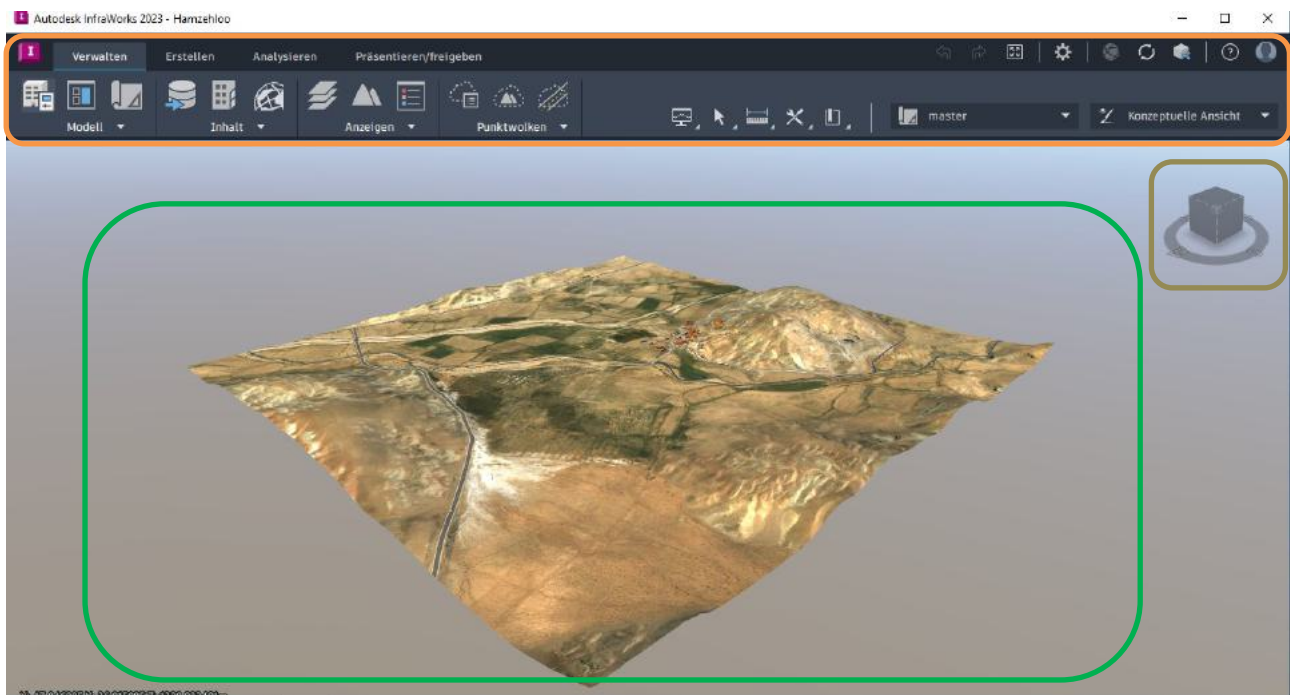


Abbildung 11: Benutzeroberfläche Autodesk InfraWorks (eigene Aufnahme)

Bei der BIM-Software InfraWorks des Unternehmens Autodesk steht die Modellierung von Gebäuden und Infrastrukturkonzepten im Fokus. Abbildung 11 veranschaulicht die unterschiedlichen Bereiche der Benutzeroberfläche von InfraWorks. Ebenso wie bei Revit nimmt der **Zeichenbereich** den größten Platz in zentraler Position ein. Die **Multifunktionsleiste** fällt aufgrund der geringeren Möglichkeiten, die InfraWorks anbietet, deutlich geringer aus. Wird eine Funktion ausgeführt oder ein bestehendes Element ausgewählt, öffnet sich das betreffende Menü am rechten Rand der Benutzeroberfläche. In der rechten oberen Ecke befindet sich immer ein ausgegrauter Würfel. Dieser dient als **Navigation** innerhalb der Zeichenfläche. Diese Form ist bei allen verwendeten Autodesk-Programmen gleich. Über die Seitenflächen des Kubus dreht sich das Modell direkt auf die jeweilige Seitenansicht, z. B. auf die Nordseite. Wird die Ecke oder Kante des Würfels gedrückt gehalten und die Maus dabei bewegt, dreht sich das Modell dementsprechend. So gestaltet sich der Perspektivenwechsel sehr einfach. Mit Hilfe des Mausekzes lässt sich in das Modell hinein- oder hinauszoomen. Speziell bei InfraWorks ist auch die Navigation mittels der Pfeiltasten zu empfehlen. Dadurch schwebt die Ansicht in die vorgegebene Richtung über das Geländemodell hinweg.

Das Besondere hierbei ist, dass die Konzepte in einem realen Kontext dargestellt werden. Dazu nutzt das Programm die Open Source Daten von OpenStreetMap. Für das Dorf Hamzehloo liegen lediglich Geländedaten und zu Teilen hinterlegte Infrastruktursysteme wie lokale Straßenzüge vor. Letztere sind allerdings im späteren Verlauf zu überarbeiten, da nicht alle Informationen mit den realen Bedingungen vor Ort übereinstimmen. Noch bevor ein neues Projekt erstellt wird, muss das Gelände mit Hilfe des *Model Builder* im Startmenü von InfraWorks ausgewählt werden. Dort öffnet sich das Geländemodell von OpenStreetMap. Um den gewünschten Standort zu finden, können die

Koordinaten eingegeben werden. Alternativ gibt es auch die Möglichkeit, manuell zum Standort zu navigieren, sofern die Koordinaten nicht bekannt sind. Anschließend sind die Kartengrenzen zu definieren, indem der relevante Bereich auf der Karte markiert wird. Abschließend muss ein Koordinatensystem gewählt werden. Dieses kann nachträglich nicht mehr verändert werden. Autodesk (2023b) weist darauf hin, dass die Zusammenarbeit u. a. mit Civil3D und Revit hier Probleme bereitet, wenn unterschiedliche Koordinatensysteme zugrunde liegen. Dies betrifft allerdings nicht den Import von dreidimensionalen Revit-Modellen zu InfraWorks. Deshalb wird für die Thesis mit LL84 ein geografisches Koordinatensystem gewählt, da dies für InfraWorks empfohlen ist (ebd.).

Aufgrund der Nutzung echter Geländedaten lassen sich Infrastrukturprojekte unter realen Bedingungen planen, erstellen, simulieren und präsentieren. Deswegen kommt die Software in erster Linie im Städtebau, in der Verkehrsplanung sowie in der Wasser- und Energieversorgung vorwiegend während der Planungs- und Entwurfsphase zum Einsatz.



Abbildung 12: Rubriken der Multifunktionsleiste von InfraWorks (eigene Aufnahme)

Wie Abbildung 12 zeigt, konzentrieren sich auch die Funktionen des Programms größtenteils auf die Zielgruppe. Unter der Rubrik *Verwalten* können Nutzer generelle Veränderungen am Modell vornehmen. Dateiimporte aus anderen Programmen sind im Bereich *Inhalt* umzusetzen. In der Rubrik *Erstellen* werden die konkreten Bauteile und Bauten modelliert. Eine detaillierte Beschreibung der Vorgehensweise ist in Kapitel 5.5 erläutert. Die Analysen spielen in der vorliegenden Arbeit keine Rolle, da sie sich vorwiegend auf die Auslastung von Straßen und somit auf die Verkehrsplanung beschränken.

3.2.3. Autodesk Fusion 360

Fusion 360 ist im Vergleich zu den beiden vorherigen Softwares zum Bereich CAD zu zählen. Weil das Programm auch vom Unternehmen Autodesk stammt, ähnelt sich der Aufbau stark. Abbildung 13 illustriert die Benutzeroberfläche eines neu erstellten Projekts. Im Mittelpunkt steht die obligatorische **Zeichenfläche**. Hierbei sind die Achsen und der Koordinatenursprung farblich markiert. Ein Gitternetz hilft bei der Orientierung und vereinfacht den Zeichenprozess. Um einen hohen Detailgrad zu erhalten, sind die Maße bei Fusion 360 standardmäßig in Millimeter anzugeben. Revit setzt im Gegensatz dazu auf die SI-Einheit Meter. Wie in allen drei betrachteten Programmen erfolgt die **Navigation** innerhalb des Zeichenbereichs anhand des Kubus. Der **Projektbrowser** ist an der linken Seite angeheftet. Dort befinden sich alle erstellten Flächen und Volumenkörper. Für den besseren Überblick empfiehlt es sich, die Körper zu benennen. Auch Gruppierungen oder das Anlegen einer neuen Ordnerstruktur ist v. a. dann ratsam, wenn das Projekt aus vielen verschiedenen Einzelkomponenten besteht. Die **Multifunktionsleiste** umfasst die zentralen Funktionen, wobei sich die einzelnen Rubriken durch Drop-Down-Listen erweitern lassen. Um beispielsweise einem Bauteil ein bestimmtes Material zuzuweisen, muss der Volumenkörper direkt ausgewählt werden. Über die

rechte Maustaste eröffnen sich weitere Optionen, die nicht in der zentralen Funktionsleiste aufgeführt sind. Fusion 360 besitzt mit der am unteren Rand fixierten **Fortschrittsleiste** ein besonderes Merkmal. Diese Funktion ermöglicht es, zu jedem beliebigen Zeitpunkt des Projektes zurückzuspringen. Dies geschieht mit Hilfe eines Schiebereglers. In selbiger Leiste kann der User auch alle bisher erstellten Elemente im Schnelldurchlauf abspielen.

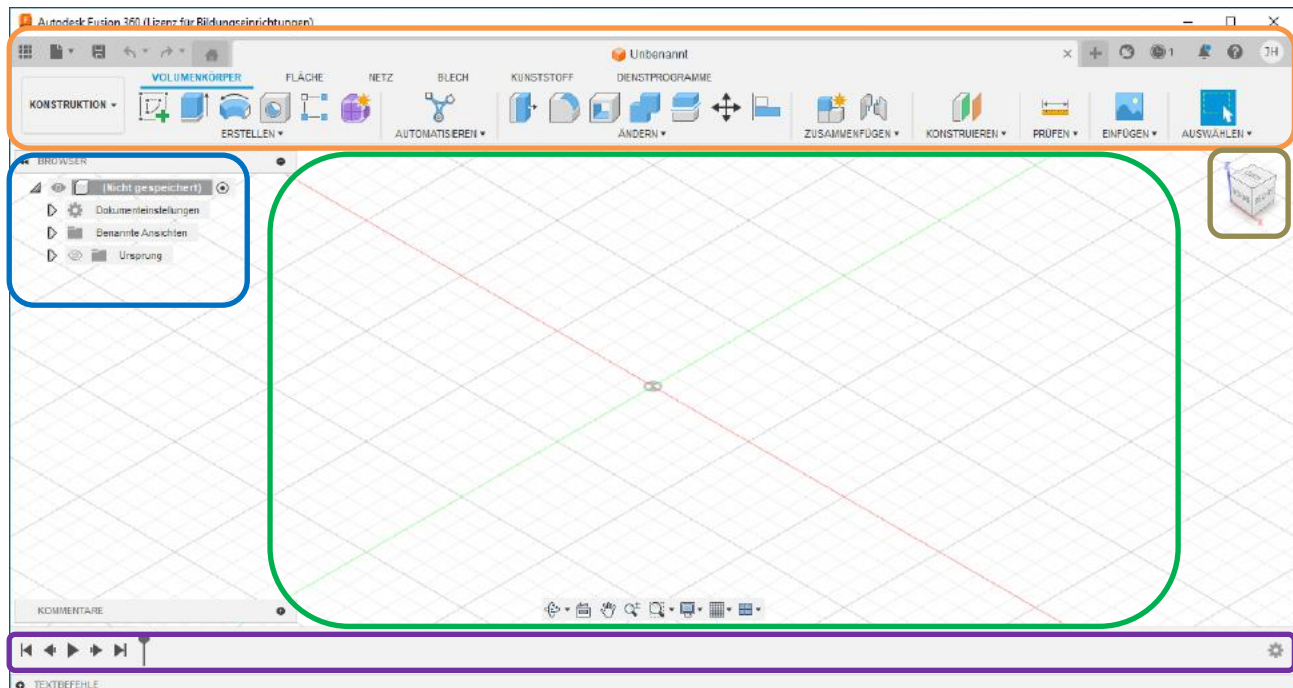


Abbildung 13: Benutzeroberfläche von Autodesk Fusion 360 (eigene Aufnahme)

Abbildung 14 demonstriert die beiden Rubriken *Volumenkörper* und *Fläche* der Multifunktionsleiste. Diese sind bei der Bearbeitung von zentraler Bedeutung. Die weiteren Reiter spielen für die Erstellung der Bauteile keine Rolle.

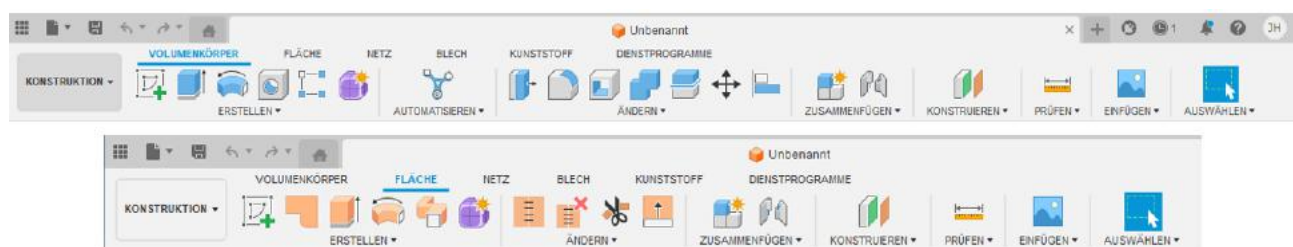


Abbildung 14: Rubriken der Multifunktionsleiste von Fusion 360 (eigene Aufnahme)

Die weiteren Abschnitte rücken dagegen bei anderen Anwendungen in den Fokus. Fusion 360 richtet sich mit der Software primär an die Fertigungsindustrie (Autodesk 2023c). Vorwiegend nutzen Maschinenbediener das Programm, um Prototypen und Fertigprodukte zu konstruieren und anschließend herzustellen. Fusion 360 ist ebenfalls für die Elektronikplanung konzipiert (ebd.). Die gemeinsame Zusammenarbeit wird dadurch erleichtert, dass alle Funktionen in einer einzigen Cloud-Softwareplattform integriert sind.

3.2.4. Alternative Softwares

Um das beste visuelle Endergebnis zu erzielen, wurden zwei alternative Softwares betrachtet. Dabei handelt es sich um die CAD-Software **Rhinoceros 3D** des amerikanischen Unternehmens Robert McNeel & Associates sowie um die BIM-Software **ALLPLAN** der deutschen Nemetschek Group.

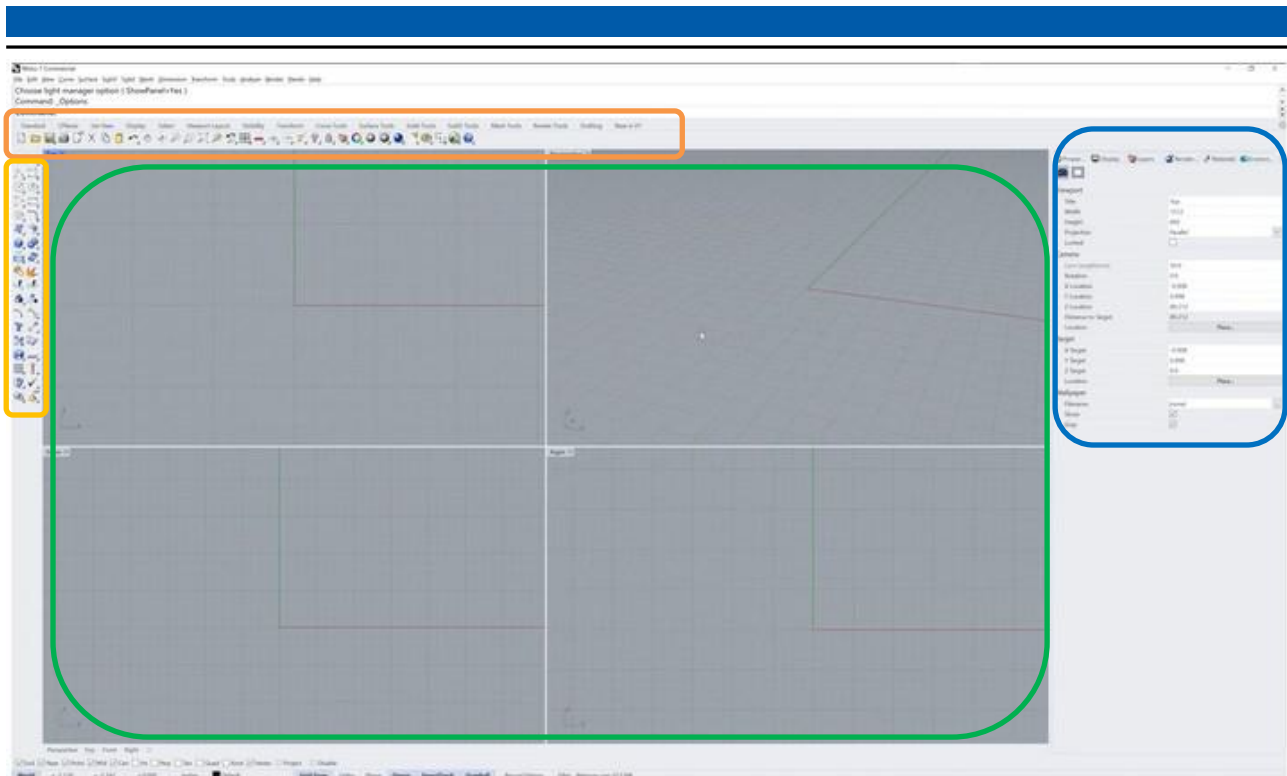


Abbildung 15: Benutzeroberfläche von Rhino (Robert McNeel & Associates 2023b)

Bei **Rhino** gliedert sich der **Zeichenbereich** in vier verschiedene Ansichtsfelder. Dabei werden die 3D-Ansicht, die Vogelperspektive, die Frontansicht sowie eine Seitenansicht dargestellt. Dies stellt einen ganzseitigen Überblick des Projektes während der Bearbeitung sicher. Per Doppelklick lassen sich die jeweiligen Ansichten maximieren, sodass auch Details in den einzelnen Bereichen ergänzt werden können. Des Weiteren verfügt jedes der vier Fenster über individuelle Menüs, die sich via Drop-Down-Liste öffnen lassen. Neben der **Multifunktionsleiste** verfügt Rhino auch über eine **Werkzeugpalette**, die linksseitig fixiert ist. Diese variiert je nach ausgewählter Rubrik der Multifunktionsleiste. Das **Eigenschaftenmenü** befindet sich am rechten Rand der Benutzeroberfläche.

Die Software basiert auf den sog. NURBS-Kurven¹. Die hohe Anzahl verschiedenster Funktionen eröffnet den Nutzenden beliebige Formen, Bauteile und Projekte in einem sehr hohen Detailgrad zu modellieren. Dementsprechend vielfältig gestaltet sich die Zielgruppe der Software, wobei vorwiegend Unternehmen der Fertigungsbranche die Software verwenden. Die Firmen, welche Rhino überwiegend einsetzen, reichen von klassischen Architekturbüros über Schmuckdesigner bis hin zur Schiffs-, Flugzeug- und Automobilbranche. (Robert McNeel & Associates 2023b)

ALLPLAN konzentriert sich dagegen eher auf die Durchführung von Bau- und Infrastrukturprojekten. Dabei liegt das Hauptaugenmerk auf den bisherigen Workflows der Unternehmen. Ziel ist es hierbei, kundenorientierte Lösungen zu schaffen, die auf Effizienzsteigerung ausgelegt sind. Die BIM-Software kommt dabei ab den ersten Entwürfen zum Einsatz und endet in der Regel mit detaillierten Bauplänen. Ähnlich wie Revit bietet ALLPLAN eine breite Palette an Funktionen. Deshalb wird die Software nicht nur von Architekten und Tragwerksplanern genutzt, sondern auch in den Bereichen Gebäudetechnik, Brückenbau und Baustellenplanung. Des Weiteren kommt das Programm im Herstellungsprozess von Fertigteilen zum Einsatz. (Nemetschek SE 2023)

¹ NURBS-Kurven (Non Uniform Rational Basic Splines) stellen mathematische Verfahren zur Beschreibung von dreidimensionalen Polylinien dar. Eine solche Kurve definiert sich durch die Position von Kontrollpunkten sowie deren Grad- und Gewichtswerten. Die Verwendung von NURBS-Kurven eignet sich v. a. bei der Visualisierung von Flächen, die auf Kurven basieren. (Vectorworks 2023)

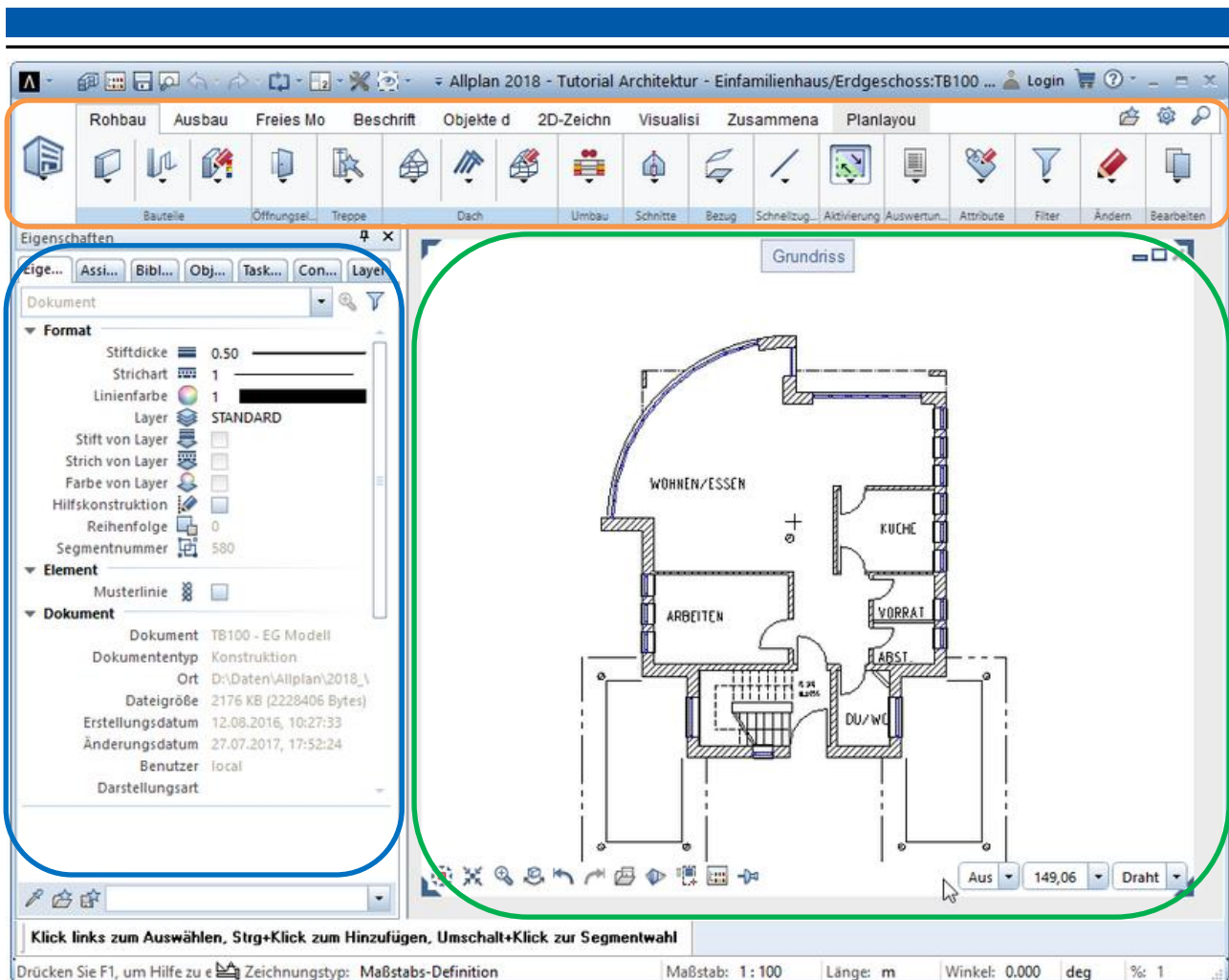


Abbildung 16: Benutzeroberfläche von Nemetschek ALLPLAN (ALLPLAN Schweiz AG 2023)

Abbildung 16 zeigt die Benutzeroberfläche der Software ALLPLAN. Der Aufbau gleicht den bereits vorgestellten Programmen. Die **Multifunktionsleiste** gibt einen Überblick bezüglich der Funktionen, über die die Software verfügt. Diese ist jedoch im Vergleich zu den anderen Programmen nicht starr, sondern kann bei Bedarf auch an die untere Leiste des Arbeitsbereiches angeheftet werden. Über den Button ganz links wählt der User die Rolle, die er ausübt. Dabei wird u. a. zwischen Architektur, Ingenieurbau, Umgebung und Konstruktion unterschieden. Die zur Verfügung stehenden Rollen richten sich nach der Lizenz, die erworben wurde. In der **Zeichenfläche** werden die gewählten Ansichten dargestellt und bearbeitet. Das **Eigenschaftenmenü** befindet sich linker Hand. Es impliziert mehrere Unterkategorien, wie z. B. Bibliothek, Objekte oder Assistenten. Diese sollen die Bedienung des Programms vereinfachen und tragen zur besseren Übersicht der Benutzeroberfläche bei. (ALLPLAN Schweiz AG 2023)

Weil sich sowohl die Zusammenarbeit als auch die Einarbeitung bei Produkten des gleichen Unternehmens deutlich einfacher gestaltet, fiel die Wahl auf die Programme Revit, InfraWorks und Fusion 360.

3.2.5. Vergleich der verschiedenen Softwares

Die drei verwendeten Programme werden in diesem Unterkapitel miteinander verglichen. Dabei konzentriert sich die Bewertung spezifisch auf das vorliegende Projekt in Hamzehloo. Des Weiteren erfolgt eine Ausarbeitung der Stärken und Schwächen jeder Software, die während der Bearbeitung zum Tragen kamen.

Jedes Programm wird in dieser Arbeit für einen speziellen **Anwendungsbereich** verwendet. Die Modellierung der einzelnen Gebäude der Wasserversorgungsinfrastruktur findet in Revit statt. Für die Erstellung einzelner Bauteile, welche die lokale Verfügbarkeit und Gegebenheiten sowie die Ansprüche berücksichtigen, kommt Fusion 360 zum Einsatz. Die modellierten Elemente werden anschließend in das Gebäudemodell in Revit importiert. Bei InfraWorks liegt der Fokus auf der Modellierung des Dorfes und dessen Umgebung. Außerdem erfolgt in diesem Programm die Verlegung der Trasse. Um diese zu realisieren, werden die in Revit erstellten Bauten in InfraWorks importiert. Dementsprechend vereint das Modell in InfraWorks alle zuvor erstellten Komponenten.

Eine **Stärke** stellen in **Revit** die Automatismen des Programms dar. Sobald Änderungen im Grundriss vollzogen werden, generiert und aktualisiert die Software automatisch alle erstellten Schnitte, Ansichten aller Seiten sowie die dreidimensionalen Modelle. Dies reduziert die benötigte Arbeitszeit enorm, da nicht alle Anpassungen einzeln erneuert werden müssen. Außerdem besticht die Software mit den integrierten Funktionen unterschiedlicher Fachdisziplinen. Dies ermöglicht die Nutzung eines einzelnen Programmes für die Erstellung der Bauwerke. Darüber hinaus existiert in Revit eine Online-Bibliothek mit einer Vielzahl von Bauteilen. Diese ist direkt mit der Software verknüpft, sodass die einzelnen Komponenten leicht ausgewählt und in das Modell integriert werden können. Die Eigenschaften der Elemente lassen sich zudem noch bearbeiten, falls die Form oder das Material nicht wie gewünscht hinterlegt ist. Sofern kein ähnliches Bauteil verfügbar ist, lassen sich selbst erstellte Elemente unkompliziert hinzufügen. Generell verfügt Revit über eine große Datenbank, welche die jeweiligen Komponenten im Hintergrund mit detaillierten Informationen versorgt. Beispielsweise verknüpft die Software nicht nur optische Eigenschaften mit den jeweiligen Materialien, sondern auch physikalische. Dies ermöglicht Berechnungen zur Wärmeleitfähigkeit, Standfestigkeit des Gebäudes, Einbezug von Lastfällen oder zur Massenberechnung. Diese Daten orientieren sich an den ausgewählten Werkstoffen. Doch andere Informationen richten sich nach den jeweils geltenden DIN-Normen. Zum Beispiel sind bereits die korrekten Maße für die jeweiligen Rohrdurchmesser hinterlegt oder die Türgriffe und Steckdosen in der empfohlenen Höhe angebracht. Diese simplen Hilfen unterstützen die normgerechte und sichere Bauweise, während gleichzeitig die Arbeitszeit reduziert wird. Nichtsdestotrotz sind individuelle Anpassungen jederzeit möglich. Beispielsweise kann der Aufbau der Bodenplatte nach den spezifischen Bedürfnissen angepasst werden. Auch Materialien können komplett neu konzipiert werden. In Summe führt dies dazu, dass die Modelle in einem sehr hohen Detailgrad realisiert werden können. Eine weitere Stärke resultiert aus dem Rendern. Dieser Abschnitt ist bereits in das Programm integriert. Dadurch lassen sich die Gebäude zu verschiedenen Lichtbedingungen darstellen. Dies ermöglicht die Überprüfung der künstlichen Beleuchtung, weil die Verhältnisse sowohl zu Tages- als auch Nachtzeit visualisiert werden können. Ein großer Vorteil stellt auch das Feature *Walkthrough* dar. Die Kamerafahrten verdeutlichen allen Projektbeteiligten die geplanten Bauabsichten und vermitteln ein genaues Bild des Projektes.

Revit besitzt wie jedes Programm auch einige **Schwächen**, die sich sowohl auf das Programm an sich als auch auf einzelne Funktionen beziehen. Gerade für Anfänger gestaltet sich die Software als sehr komplex und schwierig nachzuvollziehen. Zwar sind die Funktionen an sich logisch miteinander verknüpft, dennoch teils in mehreren Unterebenen versteckt. Auch die umfangreiche, verschachtelte Multifunktionsleiste (siehe Abbildung 9) führt anfangs zu Schwierigkeiten, da nicht alle Funktionen auf dem ersten Blick auffindbar sind. Daraus resultiert ein hoher Zeitaufwand zum Einarbeiten und Erlernen des Programms. Trotzdem profitieren User durch eine steile Lernkurve gerade zu Beginn der Softwarenutzung. Doch auch einzelne Funktionen bieten Verbesserungspotenzial. Je nachdem welche Vorlage im Projekt genutzt wird, stehen leicht abgeänderte Voraussetzungen zur Verfügung. Dies führt dazu, dass, wenn die Priorität auf Architektur und Ingenieurbau liegt, teilweise Komplikationen bei der Nutzung im Bereich Gebäudetechnik auftreten. Kabel sind z. B. lediglich in einer zweidimensionalen Darstellung im Grundriss möglich. Es gibt zwar die Möglichkeit, Kabel auch über die Stromkreise zu definieren. Dies funktioniert allerdings nur dann, wenn alle Elektro-Bauteile in Revit hinterlegt sind und keine Elemente in Fusion 360 modelliert werden. Ebenso ist die Verlegung der Rohrleitungen bei der Nutzung dieses Vorlagentyps etwas komplizierter. Normalerweise ermög-

licht Revit eine zusammenhängende Verlegung und Verschiebung des Rohrleitungsnetzes. Wenn der Fokus allerdings nicht auf der Gebäudetechnik liegt, können lediglich zwei Elemente miteinander verbunden werden. Des Weiteren bereitet die Nutzung der Topografie vorwiegend im Bereich Tiefbau Probleme. Wenn das Gebäude mit einer Erdschicht überdeckt modelliert werden soll, stößt die Software an ihre Grenzen. Denn in diesem Fall kann keine Gebäudesohle verwendet werden. Dies hat zur Folge, dass die Topografie im Gebäudeinnern weitergeführt wird und der Raum im Programm mit Erde gefüllt ist. Revit bietet für dieses Darstellungsproblem bisher keine Lösung an, weil Alternativen zu Berechnungsfehlern im Programm führen. Die Erstellung eines Flachdaches, wie sie üblicherweise in der ländlichen Region Hamzehloo vorkommt, kann ebenfalls nicht mit den klassischen Werkzeugen für Dächer ausgeführt werden. Stattdessen bietet es sich an, Flachdächer über Geschossdecken zu modellieren und nach den individuellen Bedürfnissen anzupassen.

Bei **InfraWorks** liegen die **Schwächen** der Software in anderen Bereichen. Hier sind Detailplanungen nicht optimal umsetzbar, da sich das Programm eher auf die erste Projektvisualisierung fokussiert, um allen Akteuren ein erstes Bild zu vermitteln. Weiterhin offenbart InfraWorks Schwierigkeiten beim Import unterschiedlicher Dateiformate. Standardmäßige 3D-Dateien, die von anderen Autodesk Programmen reibungslos verarbeitet werden, führen beim Import in InfraWorks teilweise zu hohen Datenverlusten. Bei Object- oder DWG-Dateien² ändert die Software nicht nur die Farbgebung einzelner Komponenten, sondern auch das Material. Auch kann nicht die gesamte Innenausstattung angezeigt werden. Außerdem ist die Eingliederung des *Model Builder* gewöhnungsbedürftig. Wie bereits zuvor beschrieben, muss das Geländemodell erstellt werden, bevor ein neues Projekt geöffnet wird. Im Projekt selbst erfolgt lediglich die Auswahl des Geländes. Die vorhandenen Funktionen in InfraWorks offerieren allerdings, dass auch im späteren Verlauf Geländemodelle erstellt werden können. Auch ermöglicht das Programm die Eingabe zielgerichteter Koordinaten und die Wahl eines Koordinatensystems. Jedoch erzielen diese Eingaben nur dann ein positives Ergebnis, wenn bereits ein Modell existiert und geladen ist. Die Daten des Geländemodells stammen aus OpenStreetMap. Diese sind aber für das Untersuchungsgebiet fehlerbehaftet. Aufgrund dessen ist eine Nachbearbeitung und Kontrolle unabdingbar. Generell weichen auch die Höhenpunkte des Modells von den vor Ort aufgenommenen GPS-Daten ab. Ob dies an den Daten von OpenStreetMap oder der App Locus Map liegt, konnte nicht zweifelsfrei geklärt werden. Die Planungen basieren allerdings auf den vor Ort aufgenommenen GPS-Daten. Ein weiterer Schwachpunkt der Software stellt die Verlegung paralleler Leitungen dar. Im Programm gibt es keine Funktion, die eine solche Ausführung unterstützt. Die händische Verlegung funktioniert bei einem Strang ohne Probleme. Mehrere Rohrleitungen mit geringem Abstand in einer Trasse überlagern sich häufig und müssen einzeln versetzt werden. Denn InfraWorks nimmt gleiche Bezugspunkte an, um die Leitungen automatisch zu verbinden. Ein weiterer Kritikpunkt am Programm sind die Grafikprobleme. Obwohl die Modelle an einem leistungsstarken Simulationsrechner mit sehr guter Grafikkarte erstellt werden, kommt es während der Bearbeitung oftmals zu Komplikationen, die dazu führen, dass das Programm abstürzt.

Als **Stärken InfraWorks** ist u. a. der Aufbau des Programms zu sehen. Das Layout ist sehr übersichtlich gestaltet und ermöglicht es auch Einsteigern, sich intuitiv zurechtzufinden. Dadurch lässt sich das Programm sehr schnell und unkompliziert erlernen. Darüber hinaus bietet die Software eine breite Palette an sog. Stadtmöbeln. Darunter sind sämtliche Komponenten der Infrastrukturanlagen, aber auch einzelne Elemente wie Fahrzeuge, Personengruppen oder Pflanzen zu verstehen. Diese Elemente werten das Modell in der Hinsicht auf, dass sie das Dorf mit Leben füllen und somit realistischer darstellen. Einerseits dient dies dem Ziel, den Projektpartnern eine bessere Vorstellung des Projektes zu geben. Andererseits vergrößern solche Visualisierungen und anschaulichen Modelle die Chancen, künftig Fördermittel für das Projekt zu generieren. Dies liegt insbesondere an der wohl größten Stärke, und zwar der Arbeit in realer Umgebung. Auch wenn die Infrastruktur in Teilen nachbearbeitet werden muss, besitzt das Endresultat große Ähnlichkeiten mit dem tatsächlichen Dorf

² DWG-Dateiformate werden für technische Zeichnungen und Modellierungen in Autodesk AutoCAD verwendet. Das CAD-Format steht für *drawing* und enthält zwei- und dreidimensionale Vektorgrafiken. (Adobe 2023)

Hamzehloo. Der digitale Zwilling nutzt die realen Geländedaten der Region, wodurch das Modell deutlich anschaulicher und greifbarer wird.

Ebenso wie InfraWorks überzeugt **Fusion 360** mit einem sehr übersichtlichen Layout. Dies verkürzt die Einarbeitungsphase. Zudem erlernen Programm-Neulinge die unterschiedlichen Funktionen schnell und finden sich intuitiv auf der Benutzeroberfläche zurecht. Eine weitere **Stärke** der Software ist, dass der Export in sehr viele verschiedene Dateiformate möglich ist. Dies gestaltet die Zusammenarbeit und den Import in andere Programme sehr einfach. Einen weiteren Vorteil bietet die Fortschrittsleiste. Diese erleichtert es, verschiedene Fortschritte zu betrachten, einzelne Teilschritte der Konzeptionierung im Nachhinein zu ändern oder begangene Fehler innerhalb kürzester Zeit zu beheben. Des Weiteren eignet sich Fusion 360 für die Erstellung simpler Bauteile. Über die geometrischen Grundformen lassen sich die Komponenten zügig modellieren. Gleichzeitig ist eine sehr detaillierte Darstellung möglich, weil alle Angaben nicht nur manuell gezeichnet, sondern auch direkt in Eingabefenstern als Zahlenwerte eingegeben werden können. Aufgrund der Gelenkfunktion lassen sich außerdem bewegliche Objekte realisieren. Diese drehen sich um eine bestimmte Achse oder zwischen zwei Winkeln.

Eine **Schwachstelle** von **Fusion 360** liegt in den vielen Updates, welche die Arbeit mit Fusion 360 erschweren. Es ist darauf hinzuweisen, dass Fusion 360 nicht gewährleistet, dass alle bisher gespeicherten Daten anschließend problemlos nutzbar bleiben. Deshalb gilt es darauf zu achten, dass die Daten stets doppelt gesichert werden. Auffällig ist zudem, dass selbst erstellte Materialien beim Import in andere Programme nicht übernommen werden. Deshalb sollten nur die in der Software hinterlegten Materialien verwendet werden. Um Unterscheidungen sichtbar zu machen, sollte stattdessen auf eine andere farbliche Darstellung ausgewichen werden.

Für die Masterarbeit wurden Studentenlizenzen verwendet. Diese stehen über die Universität kostenlos zur Verfügung. Ansonsten belaufen sich die jährlichen **Kosten** pro Nutzer bei Revit auf 3.303 €, bei InfraWorks auf 2.369 € und bei Fusion 360 auf 572 € (Autodesk 2023a). Für Privatanwender bietet Autodesk zumindest bei Fusion 360 eine kostenlose Lizenz an, die jedoch nicht über alle Funktionen verfügt. Im Vergleich dazu liegt der Jahrespreis einer ALLPLAN-Lizenz zwischen 1.300 € und 4.000 €, abhängig davon, welche Funktionen das Paket beinhaltet (ALLPLAN Deutschland GmbH 2023). Die Lizenzen von Rhino sind dagegen permanent und laufen nicht ab. Der Preis der aktuellsten Version beläuft sich auf 995 €, wobei Upgrades älterer Versionen rund 300 € kosten (Robert McNeel & Associates 2023a).

Die drei Programme erfordern jeweils unterschiedliche **Systemanforderungen**. Fusion 360 besitzt hierbei die geringsten Anforderungen und kann ohne größere Probleme auf einem handelsüblichen Laptop genutzt werden. Revit dagegen benötigt einen sehr großen Arbeitsspeicher, während InfraWorks sehr hohe Ansprüche an die Grafikkarte stellt.

Tabelle 1 fasst die unterschiedlichen Aspekte der drei verwendeten Programme noch einmal zur besseren Übersicht zusammen. Die wichtigsten Funktionen der drei Softwareanwendungen sind im Glossar beschrieben.

Tabelle 1: Vergleich der verschiedenen Programme (eigene Darstellung)

Kriterium	Revit	InfraWorks	Fusion 360
Anwendung	Modellierung einzelner Gebäude	Modellierung des Dorfes und der Trasse	Modellierung einzelner Bauteile
Positive Aspekte	<ul style="list-style-type: none"> + Automatische Generierungen + Vielzahl von Bauteilen + Hintergrunddaten + individuelle Anpassungen + normgerechte Daten + Rendern + sehr hoher Detailgrad + fachübergreifende Funktionen + Walkthrough 	<ul style="list-style-type: none"> + übersichtliches Layout + intuitives Erlernen + kurze Einarbeitung + umfangreiche Palette an Stadtmöbeln + Arbeit mit realer Umgebung 	<ul style="list-style-type: none"> + übersichtliches Layout + intuitives Erlernen + kurze Einarbeitung + Fortschrittsleiste + viele Exportformate + hoher Detailgrad + Erstellung beweglicher Objekte
Negative Aspekte	<ul style="list-style-type: none"> - Komplexität - hoher Zeitaufwand zum Erlernen - Komplikationen bei Gebäudetechnik - Komplikationen im Bereich Tiefbau - Konstruktion von Flachdächern 	<ul style="list-style-type: none"> - keine Detailplanung - Komplikationen bei Datenimport - Grafikprobleme - Model Builder - fehlerhafte Datenlage im Geländemodell - parallele Leitungen 	<ul style="list-style-type: none"> - Importprobleme neu erstellter Materialien - Updates
Art der Software	BIM	BIM	CAD
Lizenzkosten	3.303 € pro Jahr	2.369 € pro Jahr	572 € pro Jahr
Systemanforderungen	Hoch (Arbeitsspeicher)	Hoch (Grafikkarte)	Niedrig
Zusammenarbeit mit anderen Programmen	gut	mittel	Sehr gut
Nutzergruppen (allgemein)	Architektur Ingenieurbau Bauunternehmen Gebäudetechnik	Städtebau Verkehrsplanung Wasserversorgung Energieversorgung	Fertigungsindustrie Elektronikplanung

3.2.6. Diver-Office

Mit Hilfe der Software erfolgt die Verwaltung und Auswertung der eingesetzten Grundwasserdatenlogger. Das Programm verfügt über verschiedene Funktionen. Darunter zählen das Starten und Stoppen der Diver, das Auslesen der Daten sowie die Kalibrierung der CTD-Diver. In der Software sind bereits unterschiedliche Versuchsaufbauten mit definierter Gesamtdauer und spezifischen Messintervallen hinterlegt. Bei dem vorinstallierten Messprogramm über 72 Stunden fallen z. B. die Intervalle während der Absenkung und dem Wiederanstieg kleiner aus als während der stationären Phase. Des Weiteren beinhaltet die Software eine barometrische Kompensation. Dadurch lässt sich die korrekte Höhe der Wassersäule ermitteln. Die aufgenommenen Daten werden im Programm als Grafik und Tabelle angezeigt. Diese können auch exportiert werden, um sie weiter aufzubereiten. (Hydrosens 2023)

Abbildung 17 gibt einen Einblick in die Software *Diver-Office*.

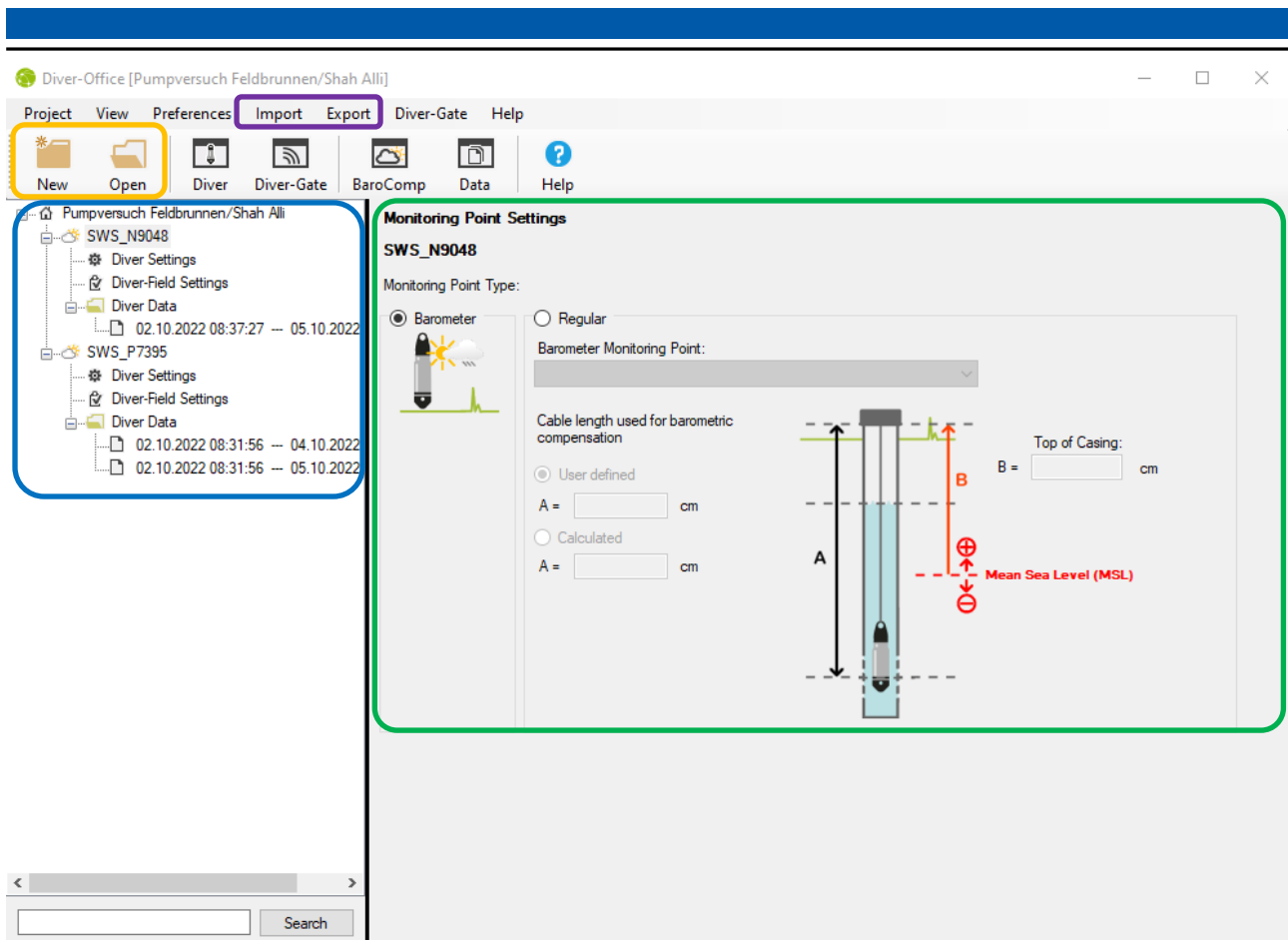


Abbildung 17: Benutzeroberfläche der Software Diver-Office (eigene Aufnahme)

Die Benutzeroberfläche gliedert sich in zwei Hauptbereiche. Linker Hand befindet sich das **Menü**, in dem sowohl die Daten des Baro-Divers als auch des CTD-Divers zu sehen sind. Neben den festgelegten Einstellungen des Datenloggers und der Bedingungen im Feld ist auch der Datensatz jedes Divers im Menü mit dem jeweiligen Zeitstempel hinterlegt. Die Daten müssen zunächst **importiert**³ werden. Anschließend sollten diese für jeden Brunnen bzw. Pumpversuch in einem **neuen Projekt** abgespeichert werden. Im weiteren Verlauf kann der zu bearbeitende Datensatz über den Ordner **Öffnen** abgerufen werden. Für eine weitere Bearbeitung und Visualisierung via Excel oder MS Office bietet es sich an, den vollständigen Datensatz zu **exportieren**. Die **Anzeigefläche** nimmt den Großteil der Benutzeroberfläche ein und variiert je nach ausgewähltem Element des Menüs. In diesem Fall zeigt es den Baro-Diver und dessen Einstellungen an. Die Software ermöglicht es den Usern, die jeweiligen Messwerte wie z. B. die Kabellänge selbstständig einzutragen.

Der Vorteil von Diver-Office besteht darin, dass mehrere Projekte parallel verwaltet werden können. Außerdem ist die Verarbeitung der Daten einfach, auch weil der Luftdruck automatisch kompensiert werden kann. Ein großer Pluspunkt stellt die Nutzung des Programms im Feld dar. Denn die Software *Diver-Office* arbeitet offline. Dies ermöglicht eine Kontrolle und Speicherung der Daten direkt vor Ort, sodass die Datenlogger unmittelbar im Anschluss für einen weiteren Pumpversuch zur Verfügung stehen. Besonders in Hamzehloo kommt diese Stärke zum Tragen, weil dort weder Zugang zum Internet besteht noch viel Zeit zwischen den langfristig angelegten Pumpversuchen zur Verfügung stand.

³ Die Diver werden mit einem Seil in die Brunnen hinabgelassen. Für das Auslesen der Daten und den Import in die Software ist eine spezielle Ausleseeinheit notwendig. Dazu muss der Deckel des Datenloggers aufgeschraubt werden. Über eine optische Schnittstelle wird der Datensatz anschließend an die Software übertragen. (Schlumberger Water Services 2014)

4. Ermittlung des IST-Zustandes

In diesem Kapitel wird der aktuelle Stand des Projektes präsentiert. Dabei wird der IST-Zustand mit der Bestandsaufnahme aus dem Jahr 2019 verglichen und Änderungen herausgearbeitet. Allerdings liegt der Fokus weiterhin auf der Umsetzung des damaligen Konzepts. Aufgrund dessen müssen alle Abweichungen diskutiert und auf Notwendigkeit überprüft werden. Hierbei spielen die klimatischen Bedingungen vor Ort, aber insbesondere aktuelle Erkenntnisse eine große Rolle. Des Weiteren zeigen die Ausführungen die Ergebnisse durchgeführter Arbeiten auf. Sowohl die Pumpversuche als auch die Wasseranalysen stehen dabei im Mittelpunkt. Denn diese beeinflussen die folgende Wahl des Brunnens, welcher final für die Wasserförderung eingesetzt wird. Die Bewertungskriterien umfassen dabei nicht nur die ingenieurstechnische Sichtweise, sondern beleuchten auch soziale Hintergründe.

Bereits im Jahr 2019 fanden zwei Kampagnen vor Ort statt. Aufgrund der Auswirkungen infolge der Coronapandemie kamen die Arbeiten zeitweise zum Erliegen. Bei diesen Aufenthalten erfolgte eine Erkundung des Gebiets rund um Hamzehloo. Dabei wurden neben geoelektrischen Untersuchungen auch Pumpversuche an mehreren Brunnen durchgeführt. Eichhorn (2020) entwickelte sechs verschiedene Varianten einer Wasserversorgungsinfrastruktur, die alle das Potenzial zur Realisierung hatten. Die Berechnungsgrundlagen basierten auf dem ermittelten Wasserverbrauch der Bewohner Hamzehloos. Neben den Anlagen der Wasserversorgung soll zudem ein Besucherzentrum im Dorf entstehen, um u. a. den Tourismus zu fördern. Die damalige Bestandsaufnahme kam zu dem Ergebnis, dass der Reza abaad Brunnen zukünftig zur Wasserförderung genutzt werden soll. Wegen des hohen Gehalts an gelösten Feststoffen (TDS) im Grundwasser ergibt lediglich die Nutzung einer Umkehrosmoseanlage zur Wasseraufbereitung Sinn, um Trinkwasserqualität zu erhalten. Dabei entstehen jedoch sehr hohe Investitions- und Betriebskosten. Eine Wirtschaftlichkeitsanalyse zeigte, dass bei der Vorzugsvariante ein kostendeckender Wasserpreis von 1 €/m³ entsteht. Weitere Details und Hintergründe sind Eichhorns Thesis zu entnehmen.

4.1. Aktuelle Situation vor Ort

Im Juni und Oktober 2022 fanden erneut Kampagnen statt. Diese Aufenthalte repräsentieren den aktuellen Stand des Projekts, der im Folgenden vorgestellt wird. Des Weiteren spiegelt die Thesis ebenfalls die neuesten Informationen der lokalen Projektbeteiligten wider, welche regelmäßig an die deutschen Projektpartner berichten.

Veränderungen gegenüber dem Ursprungskonzept

Aus unterschiedlichen Gründen muss das ursprüngliche Konzept aus dem Jahr 2019 an wenigen Stellschrauben angepasst werden. Zum einen bedarf es eine Änderung des Gebäudes, welches die **Wasseraufbereitungsanlage** beinhaltet. Der Standort am Rande des Dorfplatzes entspricht nicht den offiziellen gesetzlichen Bestimmungen Irans. Mitarbeiter der Behörde und ein Bauunternehmer aus der Region erklärten, der Abstand zum Strommast und den querenden Stromleitungen sei nicht mit der geplanten Gebäudehöhe vereinbar. Da Personen während des Baus auf das Dach steigen müssen, stellt dies ein zu großes Gefahrenpotenzial dar. Der neue Standort eignet sich allerdings in der Hinsicht gut, dass er sich gut ins Dorfbild eingliedert und direkt an der Straße liegt. So haben weiterhin alle Menschen uneingeschränkt Zugang zur Wasserentnahmestelle. Darüber hinaus beeinflusst die Veränderung des Gebäudes auch die Planung und Verlegung der Rohrleitungen innerhalb des Dorfes. Ursprünglich führten die Leitungen zwischen den Häusern den Hang hinauf. Aufgrund der neuen Örtlichkeit verläuft nun die **Trasse** entlang der Straße bergaufwärts. Dies vereinfacht zudem die Bauarbeiten, da der Bagger nicht in unwegsames Gelände vordringen muss und ausreichend Platz zum Arbeiten hat. In beide Entscheidungsprozesse und -findungen waren die Bewohner entscheidend involviert, wodurch die Akzeptanz für die Planung erhöht wurde.

Abbildung 18 zeigt sowohl den ursprünglichen als auch den neuen Standort des Aufbereitungshäuschens anhand einer Luftaufnahme des Dorfes.



Abbildung 18: Alter (blau) und neuer Standort (gelb) des Gebäudes der Wasseraufbereitungsanlage (Google Earth 2021)

Zum anderen erfolgte eine Anpassung des **Rohrdurchmessers**. Statt den Wasserleitungen mit einer Nennweite von DN 80 werden PE-Rohre mit DN 75 verlegt. Dies resultiert aus der Verfügbarkeit vor Ort. Die etwas kleineren Durchmesser sind häufiger auf dem lokalen Markt vorhanden. Dies ist insbesondere deswegen von Relevanz, weil Iran aufgrund der Restriktionen abhängig von den lokal verfügbaren Materialien ist. Falls es in Zukunft mehr Rohre benötigt oder Ersatzteile beschafft werden müssen, können die Dorfbewohner oder beauftragte Firmen diese besorgen, ohne dass Reparaturen längere Ausfallzeiten zur Folge haben.

Eine weitere Veränderung betrifft den Reza abaad Brunnen. Eine **Vertiefung des Brunnens** war bereits zuvor angedacht. Infolge der neuen Erkenntnisse aus den gewonnenen Daten der Pumpversuche und der regelmäßigen Wasserstandsmessungen wurde diese allerdings essenziell für den nachhaltigen Betrieb des Brunnens. Der gesunkene Wasserspiegel ist eine direkte Konsequenz des Klimawandels und dessen Auswirkungen in der Region. Für die Vertiefung des Brunnens stellte die Wasserbehörde lediglich eine Genehmigung zur Handgrabung aus. Weil jedoch diese Arbeitsweise nicht zum gewünschten Erfolg führte, bewilligte die Behörde im Januar 2023 eine Bohrgenehmigung. Dadurch änderte sich nicht nur die Tiefe des Brunnens, sondern auch dessen Ausbau. Weitere Informationen bezüglich der Brunnenvertiefung sowie der Ergebnisse der Pumpversuche sind den beiden Unterkapiteln 4.2 bzw. 4.5 zu entnehmen.

Durchgeführte Arbeiten in den Jahren 2022 und 2023

Um die Arbeiten durchführen zu können, bedarf es zunächst die Beschaffung einiger Materialien. Für die mehrtägigen Pumpversuche, die parallel verliefen, brauchte es eine neue **Tauchmotorpumpe**. Zwar besitzt das Dorf bereits eine Pumpe dieser Art, allerdings soll das Eigentum der Dorfbewohner

nicht in die geplante Wasserversorgungsinfrastruktur integriert werden. Denn die Tauchpumpe aus dem Bestand wird für die eigene Feldbewässerung und zur Förderung von Brauchwasser aus dem Dorfbrunnen verwendet. Bei der Investition lag das Augenmerk zudem darauf, dass die neue Pumpe die Anforderungen für den zukünftigen Betrieb erfüllt. Das lokal verfügbare Modell 4 SKM 200 eignet sich am besten. Das Datenblatt mit der Pumpenkennlinie befindet sich im Anhang (Abbildung 91). Die maximale Förderhöhe beträgt laut Herstellerangaben 140 m. Mit Einbezug eines großen Sicherheitsfaktor von 25 % beläuft sich die für das Vorhaben benötigte Förderhöhe auf ca. 80 m. Die Annahme des Sicherheitsfaktors beruht auf den potenziellen Qualitätsunterschieden des Materials, da die Herstellerangaben lediglich die optimalen und nicht die Bedingungen im Realbetrieb wiedergeben. Außerdem können so Rohrreibungsverluste aufgefangen werden, falls diese größer ausfallen als die Berechnungsgrundlage voraussagt. Zudem berücksichtigt der angehobene Sicherheitsfaktor bereits die Leistungsabnahme mit zunehmender Betriebsdauer. Aus diesen Gründen wird der übliche Faktor von 10 % auf 25 % erhöht. Für die Höhendifferenz zwischen der Pumpe im Brunnen und dem Zulauf des Reservoirs liegt der Förderstrom gemäß der Pumpenkennlinie bei rund 1,3 m³/h. Dies gewährleistet eine langsame Befüllung des Reservoirs, wodurch der Wasserspiegel im Brunnen keinen starken Schwankungen unterworfen ist und die Absenkung insgesamt geringer ausfällt.

Neben der Tauchmotorpumpe wurden bereits die **Rohre** aus Polyethylen (PE) in den Durchmessern DN 75 und DN 50 erworben. Die Gesamtlänge basiert auf der Routenplanung des ursprünglichen Konzepts. Durch die Änderungen des Trassenverlaufs kommt es jedoch nur zu minimalen Veränderungen hinsichtlich der Leitungslänge, sodass diese nicht ins Gewicht fallen. Die Leitungen wurden bis zum Trassenbau in der Nähe des Dorfcentrums zwischengelagert (siehe Abbildung 19).



Abbildung 19: Lagerung der PE-Rohre im Dorf Hamzehloo (Aufnahme: N. Bagherpour Kashani)

Eine weitere große Anschaffung stellt die **Aufbereitungsanlage** dar. Die Vertragsunterzeichnung erfolgte u. a. aus finanziellen Gründen nicht wie ursprünglich angedacht bei einem Anlagenbauer bei Teheran, sondern bei einem Anbieter in Isfahan. Der Aufbau der Umkehrosmoseanlage ähnelt sich jedoch stark, sodass dies keine Änderungen der Wasseraufbereitung zur Folge hat. Neben der Anlage an sich kaufte das Team bereits Ersatzmaterial, damit die Dorfbewohner sich zunächst finanzielle Rücklagen ansparen können, bevor erste Reparatur- und Materialkosten anfallen. Im Zuge dessen wurde Antiscalent für einen Zeitraum von einem Jahr gekauft, da wegen des Materials eine längere Lagerung nicht empfohlen ist. Darüber hinaus wurden Aktivkohle, Sand und Mikrofilter für die kommenden sechs Jahre erworben. Die Aktivkohle und der Sand werden zurzeit im Container in der Dorfmitte gelagert, sodass gewährleistet ist, dass die Säcke vor Witterung geschützt sind und keine Feuchtigkeit eindringt. Die Mikrofilter und Membranen lagern dagegen noch im Archäologischen Museum in Zanjan. Die Anlage wurde bereits ins Dorf geliefert und steht mittlerweile im Gebäude der Aufbereitungsanlage. Für das Vorhaben wird die Membran LG BW 4040 R genutzt, weil diese eine längere Nutzungsdauer aufweist als ähnliche Membranen und immer lokal verfügbar ist. Das technische Datenblatt ist im Anhang (siehe Abbildung 92) hinterlegt.

Während der zweiten Kampagne im Oktober 2022 begann der **Bau des Gebäudes** für die **Aufbereitungsanlage**. Aufgrund der hohen Inflation in Iran stiegen die Baukosten stark an. Deshalb mussten die Planungen bezüglich einer größeren, zusätzlichen Lagerfläche innerhalb des Bauwerks verworfen werden. Stattdessen orientiert sich die Bauweise wieder an der Vorzugsvariante aus dem Jahr 2019. Noch im Oktober 2022 wurden die Arbeiten am Fundament abgeschlossen. Anhand der Pläne konstruierten lokale Arbeitskräfte den weiteren Rohbau, wobei die Projektpartner vor Ort die Fortschritte begutachteten und dokumentierten. Die wichtigsten Meilensteine sind den folgenden Abbildungen zu entnehmen. Die detaillierte Beschreibung des Gebäudes der Wasseraufbereitung erfolgt anhand der Modellierung in Kapitel 6.3.



Abbildung 20: Platzieren der Stahlgestänge zur Bewehrung des Fundaments und der Stützen (eigene Aufnahme)



Abbildung 21: Gießen des Fundaments (eigene Aufnahme)



Abbildung 22: Hochziehen der Außenwände (Aufnahme: H. Zifar)



Abbildung 23: Fertigstellung des Gebäudevorsprungs (Aufnahme: H. Zifar)



Abbildung 24: Positionierung der Sandwichelemente des Dachaufbaus (Aufnahme: H. Zifar)



Abbildung 25: Aufbringen der Betondeckschicht (Aufnahme: H. Zifar)



Abbildung 26: Gesamtübersicht des Rohbaus (Aufnahme: H. Zifar)

Eine der wichtigsten Baumaßnahmen stellt die **Vertiefung des Reza abaad Brunnens** dar. Diese erfolgte im Januar 2023. Weil die Brunnenarbeiten für die gesamte Projektrealisierung essenziell sind und sich die Arbeiten von der deutschen Herangehensweise unterscheiden, widmet sich der Thematik ein eigenes Kapitel. Detaillierte Informationen sind dem Kapitel 4.5 zu entnehmen.

Im März 2023 startete der **Baubeginn der Trasse**. Die Verlegung der Rohrleitungen wurde auf Wunsch und in Absprache mit den Dorfbewohnern vorgezogen, um die Arbeiten nicht während der Feldbewirtschaftung durchzuführen. Dies würde zu Ernteaussfällen und somit auch zu finanziellen Einbußen führen. Generell spielt der Ackerbau für die Dorfbewohner eine entscheidende Rolle. Daher genießt die Feldbewirtschaftung auch Priorität gegenüber der Versorgung mit Trinkwasser. Denn die Landwirtschaft und deren Erzeugnisse bilden die Lebensgrundlage der Bewohner. Trotz häufiger Nachfragen lehnen die Projektbeteiligten das Hinzufügen weiterer Zapfstellen entlang der Hauptwasserleitung zwischen Brunnen und Reservoir strikt ab. Die Bewässerung der Felder soll weiterhin über selbstständig gegrabene Brunnen wie bisher erfolgen. Weitere Entnahmestellen durch Abzweige

sind nicht geplant und auch zukünftig untersagt. Dies hätte deutliche Druckschwankungen in der Leitung zur Folge. Des Weiteren reduziert sich durch die Doppelbelastung die Lebensdauer der Pumpe. Wer infolgedessen für den Kauf einer neuen Pumpe finanziell zu welchem Anteil aufkommen muss, birgt weitere Risiken und Konfliktpotenzial. Zudem ist insbesondere während den trockenen Monaten aufgrund des Klimawandels mit einem sinkenden Wasserstand zu rechnen. Die hohen zusätzlichen Entnahmemengen, die weit über dem Bedarf für die Bereitstellung des Brauchwassers für die Bevölkerung Hamzehloos liegen, gefährden indes die Wasserressourcen und stehen im Widerspruch zu einer klimaresilienten Wasserinfrastruktur. Oberstes Ziel des Projekts stellt die langfristige Sicherstellung der Trinkwasserversorgung der Bewohner dar. Deshalb soll die Absenkung im Brunnen so gering wie möglich gestaltet werden, damit sich dieser stets regenerieren kann.

Die Länge jedes PE-Rohres beläuft sich auf 100 m. Die Art der Verbindung zwischen den einzelnen Rohrstücken hängt von dem Durchmesser ab. Das Unternehmen, welches den Bau der Trasse vollzieht, wendet für die Rohre mit DN 75 das Spiegelschweißverfahren⁴ an. Für PE-Rohre mit DN 50 kommen Fittings aus demselben Material zum Einsatz, um die Stücke zu verbinden. Für den Trassenverlauf wird das natürliche Gefälle genutzt. Des Weiteren sind auf der Strecke der Hauptleitung keine Entlüftungsventile eingeplant. Weil die Gebäude der Wasserversorgungsinfrastruktur noch nicht errichtet wurden, liegen zurzeit lose Rohrenden vor. Bis die Anschlüsse verbunden werden können, müssen diese Endstücke unbedingt verschlossen sein, um das Eindringen von Flora und Fauna zu verhindern. Die folgenden vier Abbildungen dokumentieren den ersten Teilabschnitt des Trassenbaus.



Abbildung 27: Leitungsverlegung zum Brunnen
(Aufnahme: H. Zifar)



Abbildung 28: Leitungsverlegung zum Gebäude der
Aufbereitungsanlage (Aufnahme: H. Zifar)



Abbildung 29: Leitungsverlegung in Richtung
Ausgrabungsstätte (Aufnahme: H. Zifar)



Abbildung 30: Leitungsverlegung mittels Bagger entlang
der Routen (Aufnahme: H. Zifar)

⁴ Das Spiegelschweißverfahren stellt eine Art des Heizelementschweißens dar. Der sog. Schweißspiegel ist in diesem Fall eine PTFE-beschichtete Metallfläche, die zwischen die zu verschweißenden Flächen – hier die beiden Rohrenden – angelegt wird. Dieses Verfahren wird bei Kunststoffen angewendet. Dies liegt u. a. daran, dass z. B. Polyethylen nicht mit herkömmlichen Klebstoffen zusammengefügt werden kann. (Kern GmbH 2023)

Lokale Bauweise und Besonderheiten

Für die Errichtung der Bauwerke ist es wichtig, Informationen über die lokale Bauweise zu sammeln, um die Bauten mit den vor Ort bekannten Arbeitstechniken und vorhandenen Hilfsmitteln umsetzen zu können. Außerdem lassen sich so die Gebäude besser in das Dorfbild integrieren. Bei den Wohnhäusern wird in ältere Bestandsgebäude in traditioneller Bauweise und neueren Bauten in moderner unterschieden.

Die **traditionelle Bauweise** zeichnet sich primär durch Lehmbauten aus. Diese besitzen ein schweres, dickes Dach aus Lehm, welches durch Holzbalken getragen wird. Die Wände bestehen ebenfalls aus Lehm, teils mit Stroh versetzt. Die Räume fallen klein aus und die Decken niedrig. Zudem ist eine enge Bauweise für die älteren Gebäude charakteristisch. Die Häuser sind in den Hang hinein gebaut und haben kaum Abstand zueinander. Dies führt dazu, dass sich die Häuser gegenseitig verschatten und die Temperaturen im Inneren v. a. in den heißen Sommermonaten sinken. Gleichzeitig bietet die enge Staffelung einen guten Schutz vor den im Tal herrschenden Winden. Dies führt allerdings auch dazu, dass zwischen den Bauwerken kaum Platz bleibt, um Ausbesserungsmaßnahmen an der Fassade oder dem Lehmputz durchzuführen. Dies ist problematisch, denn besonders die Lehmbauweise ist anfällig gegenüber Regenereignissen. Zwar liegen keine hohen Niederschlagswerte in der Region vor, dennoch reichen diese aus, dass ständig Reparatur- und Ausbesserungsmaßnahmen anfallen. Auch aus diesem Grund gibt es im Dorf einige Ruinen, die von den Eigentümern, die in die Stadt gezogen sind, um Arbeit zu finden, verlassen wurden. Dennoch sind die Häuser weiterhin in deren Besitz. Teilweise hegen sie zudem den Wunsch, wieder nach Hamzehloo zurückzukehren, wenn die Versorgung mit Trinkwasser sichergestellt ist.

Die **moderne Bauweise** basiert auf Wänden aus Stein oder Mauerwerk sowie einem Dach aus Sandwechelementen und Stahlbetonträgern. Darüber hinaus sind die Bauten meist mit zusätzlichen Stahlbetonstützen gegen Erdbeben gesichert. Der Dachaufbau verfügt zudem über eine abschließende Abdichtung und Isolierschicht, die das Eindringen von Wasser verhindert und Wärme zurückhält. Im Gegensatz zur traditionellen Lehmfassade verfügen die neueren Häuser über einen dunklen Zementanstrich. Auch zeichnen sich die Gebäude durch größere, offene Räume aus. Dies resultiert aus den größeren Spannweiten der Decken. Während sich im Haus der Wohn-, Schlaf-, Koch- und Essbereich befindet, sind die Nasszellen mit Bad und Dusche immer in extra Bauten ausgelagert. Außerdem beinhaltet das Grundstück moderner Bauten meist eine Hofffläche, die mit einer Mauer und einem Tor sichtgeschützt abgegrenzt ist, sodass ein Rückzugsort und Privatsphäre geschaffen wird. Sowohl Gebäude älterer als auch neuerer Bauweise verfügen über wenige Fenster. Daraus ergeben sich auch bei der heutigen Bauweise im Sommer vergleichsweise kühle Innenraumtemperaturen. Zwischen den Kampagnen 2019 und 2022 führten fünf Neubauten zur Erweiterung des Dorfes. Zwar fällt dies nicht allzu sehr ins Gewicht und es entstehen lediglich marginale Auswirkungen hinsichtlich der Wasserversorgung des Dorfes. Aber dies zeigt deutlich, dass der Wille besteht, im Dorf zu bleiben bzw. ins Dorf zurückzukehren, insbesondere dann, wenn die Trinkwasserversorgung installiert ist.

Als weitere Besonderheit ist die Verlegung einer **Gasleitung** zu nennen. Iran investiert in den letzten Jahren viel in die ländlichen Regionen und fördert diese u. a. durch Infrastrukturprojekte, um die Lebensgrundlage der ruralen Bevölkerung zu verbessern. Auch Hamzehloo wird an eine Gasleitung angeschlossen. Das behördlich beauftragte Unternehmen schloss die Grabungsarbeiten der Hauptleitung im Dorf bereits im Jahr 2022 ab. Während der Kampagne im Oktober desselben Jahres erfolgten Druckprüfungen im Leitungssystem. Abbildung 96 im Anhang stellt den geplanten Verlauf der Trasse dar.

Während der Gespräche mit den Bewohnern und den lokalen Bauunternehmern kamen immer wieder Bedenken vor Erdbeben zur Sprache und inwiefern die Gebäude in dieser Hinsicht geschützt werden sollen. Recherchen ergaben, dass Hamzehloo in der Tat in einer **erdbebengefährdeten Region** liegt. Abbildung 31 zeigt die unterschiedlichen Erdbebenzonen im Dorf Hamzehloo (mit Stern gekennzeichnet) sowie der gesamten Region.

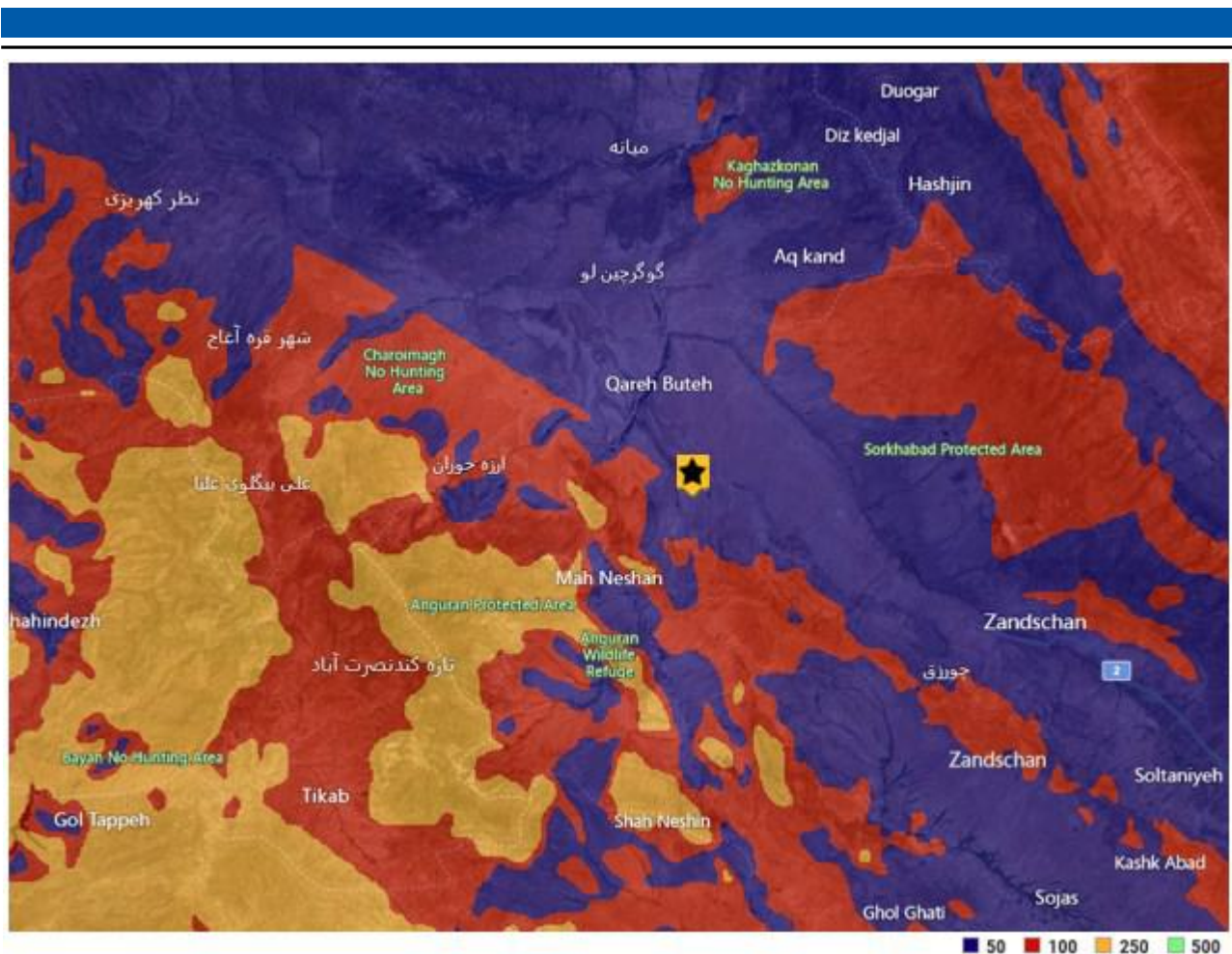


Abbildung 31: Erdbebenrisikogebiete in der Region Zanjan (FM Global 2023b)

Hamzehloo befindet sich inmitten der violetten Zone. Das entspricht der 50-Jahres-Zone. Dies bedeutet, dass die mittlere Wiederkehr schädlicher seismischer Aktivitäten zwischen Null und 50 Jahren liegt. Zudem beläuft sich die jährliche Wahrscheinlichkeit eines Erdbebens auf über zwei Prozent. FM Global (2023a) legt in den Einstufungskriterien darüber hinaus fest, dass in diesen Gebieten die Wahrscheinlichkeit, dass ein Gebäude während der Nutzungsdauer von 50 Jahren mindestens einmal durch ein Erdbeben betroffen ist, bei über 63 % liegt. Dementsprechend liegt das Untersuchungsgebiet in einer Zone mit einem sehr hohen Risiko für Erdbeben. Dies muss bei den Planungen und Bauwerken berücksichtigt werden. Tabelle 2 stellt die unterschiedlichen Zonen der Kartenlegende und deren Auswirkungen gegenüber.

Tabelle 2: Erläuterungen zu den Erdbebenzonen (eigene Darstellung in Anlehnung an FM Global 2023a)

Zone	Relatives Risiko	Farbe Legende	Mittlere Wiederkehr	Jährliche Wahrscheinlichkeit	Wahrscheinlichkeit während der Nutzungsdauer (50 Jahre)
50-Jahre	Sehr hoch	Violett	0 – 50 a	$\geq 2 \%$	$> 63 \%$
100-Jahre	Hoch	Rot	51 - 100 a	1 - 2 %	39 – 63 %
250-Jahre	Moderat	Orange	101 – 250 a	0,4 - 1 %	18 – 39 %
500-Jahre	Moderat	Grün	251 – 500 a	0,2 – 0,4 %	10 – 18 %
>500-Jahre	Gering	Weiß	> 500 a	$< 0,2 \%$	$< 10\%$

Des Weiteren zeigen die Karten von FM Global (2023b) nicht nur Erdbebendaten und -risikogebiete, sondern auch potenzielle **Überflutungsgebiete** in Flussnähe. Bezüglich Hamzehloo und der unmittelbaren Umgebung lassen sich Randzonen des Dorfes, Teile der Straße sowie der Standort des Reza abaad Brunnens als potenziell gefährdete Überflutungsgebiete identifizieren. Die jährliche Überschwemmungswahrscheinlichkeit liegt an diesen Orten bei mindestens 1 % (ebd.). Informationen hinsichtlich Jahrhunderthochwasserereignissen liefern die Daten jedoch nicht. Dennoch erfordern diese Erkenntnisse einen hochwassersicheren Ausbau des Brunnenhauses an diesem Standort.

4.2. Pumpversuche

Die Obere Wasserbehörde ordnete die Durchführung weiterer Pumpversuche an, um sicherzustellen, ob die Brunnen den Bedarf der Bewohner Hamzehloos decken können. Die handgegrabenen Brunnen reichen nicht so weit in die Tiefe wie Bohrbrunnen, weshalb sinkende Wasserstände – ausgelöst durch den Klimawandel und dessen Folgen – einen deutlich größeren negativen Effekt bewirken. Doch auch aus Sicht der Projektverantwortlichen ergeben die aktuellen Pumpversuche Sinn. Denn die Ergebnisse geben Aufschlüsse hinsichtlich der Wassermengen, die auch während der Trockenzeit verfügbar sind. Außerdem unterstützen die Tests die Entscheidung, welcher Brunnen final für die Wasserförderung verwendet wird. Falls die Pumpversuche belegen, dass keine ausreichende Wasserversorgung gewährleistet werden kann, bedarf es einer Anpassung des zugrundeliegenden Konzepts, bevor die Gebäude errichtet werden.



Abbildung 32: Brunnenstandorte um Hamzehloo (eigene Darstellung mit Daten aus Google Earth 2021)

Das primäre Ziel der Pumpversuche während der Kampagne im Oktober 2022 war es, Auskünfte über die maximalen Absenkungen zum Ende der Trockenzeit zu sammeln. Dabei sollte sichergestellt werden, dass es sich bei den Wasserressourcen nicht um Wasserlinsen handelt, deren Ergiebigkeit in kurzer Zeit erschöpft ist. Aufgrund dessen wurde die Dauer der Pumpversuche auf jeweils 72 Stunden festgelegt. Geplant war zudem ein gestufter Pumpversuch, um die stationäre Absenkung während verschiedener Fördermengen zu ermitteln. Fehlende Materialien verhinderten dies jedoch. Behelfsmaßnahmen im Feld führten zu keiner signifikanten Reduzierung des Wasserdurchflusses. Allerdings erzielten die Versuche dennoch die gewünschten Ergebnisse hinsichtlich der Absenkung bei maximaler Förderleistung. Im Laufe der Kampagne führte das Team vor Ort insgesamt drei dreitägige Pumpversuche durch. Abbildung 32 zeigt eine Übersichtskarte, auf der die vier zur Auswahl stehenden

Brunnen gekennzeichnet sind. Beim Reza abaad Brunnen erfolgte im Jahr 2022 kein Pumpversuch. Die Gründe hierfür werden im Verlauf dieses Kapitels erläutert. Die Durchführung gestaltete sich bei dem Shah Alli Brunnen, dem Ebrahimabad Brunnen und dem Hajj Aziz Brunnen jedoch erfolgreich. Diese werden im Folgenden ausgewertet.

Bei allen Pumpversuchen wurden die Daten hinsichtlich des Wasserstandes, der Temperatur und der elektrischen Leitfähigkeit hauptsächlich durch Diver gewonnen. Zusätzlich zu den Datenloggern führte das Team zudem regelmäßige Messungen des Wasserspiegels mit dem Lichtlot durch. Die redundante Datenerhebung reduziert das Risiko eines Datenverlustes. Außerdem dienen die Messungen des Wasserstands einerseits zur Überwachung des laufenden Pumpversuches, weil die Diver erst nach Beendigung des Versuchs ausgelesen werden, und andererseits zur nachträglichen Verifizierung der Diver-Daten.

Shah Alli Brunnen

Der Shah Alli Brunnen liegt östlich des Dorfes. Der handgegrabene Brunnen besitzt eine gelotete Tiefe von 7,19 m, wobei der Ruhewasserspiegel bei 2,76 m liegt. Dementsprechend beläuft sich die Wassersäule innerhalb des Brunnens auf eine Höhe von 4,43 m. Während des dreitägigen Pumpversuches kam die bereits im Dorf vorhandene Pumpe zum Einsatz. Diese generierte eine durchschnittliche Förderleistung von 5,71 m³/h. Zum Vergleich erfolgte auch ein kurzer Test mit der Pumpe, die zur Feldbewässerung genutzt wird. Hier liegt die Förderleistung bei 21 m³/h und somit deutlich über der Tauchmotorpumpe. Daraus ergeben sich signifikante Unterschiede sowohl zu Beginn der Absenkung als auch beim stationären Zustand.



Abbildung 33: Pumpversuch am Shah Alli Brunnen (eigene Aufnahme)

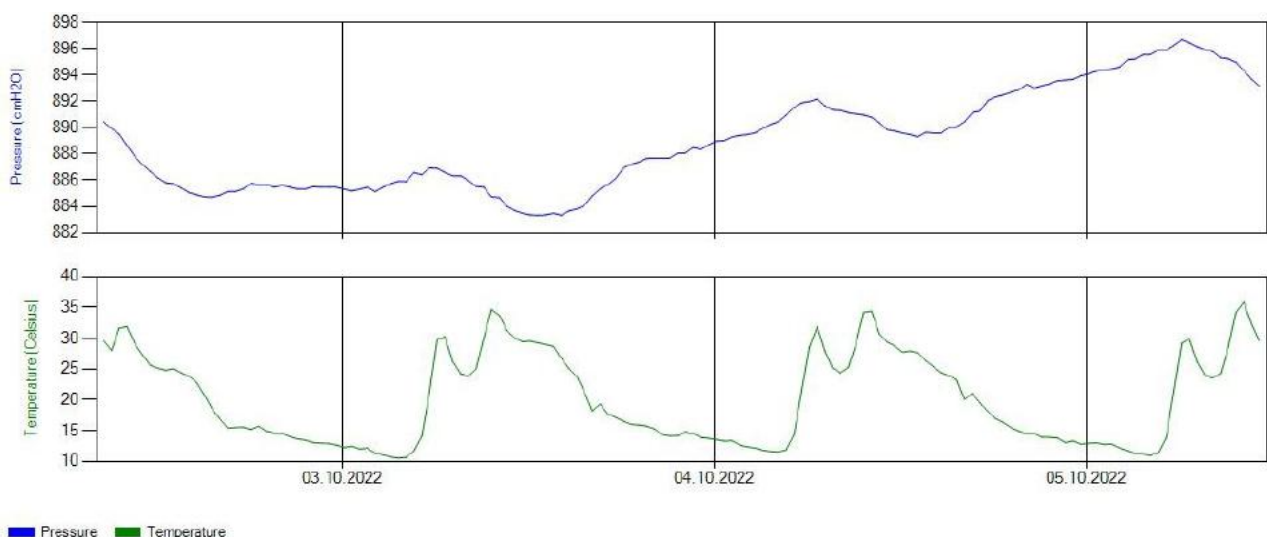


Abbildung 34: Daten des Baro-Divers während des Pumpversuches am Shah Alli Brunnen (eigene Aufnahme)

Zunächst erfolgt die Auswertung der Daten, die aus dem Baro-Diver und dem CTD-Diver gewonnen wurden. Wie in Abbildung 34 zu sehen, herrschen in dem Untersuchungsgebiet übliche Schwankungen beim Luftdruck, wobei ein langsam steigender Trend festzustellen ist. Allerdings bewegen sich die maximalen Schwankungen in einem Rahmen von maximal 20 cmH₂O. Die Einheit resultiert aus der Diver-Software, um Luftdruck und Wasserstand direkt miteinander zu verrechnen,

und gibt die Wassersäule in Zentimetern an. Die Werte dieser Einheit weichen nur minimal von denen in der Einheit Hektopascal ab⁵. Demnach liegen an diesen Tagen im Mittel rund 890 hPa vor. Die Werte der Temperaturmessungen spiegeln den immensen Kontrast zwischen Tag und Nacht wider. Die Lage im Tal in Kombination mit den dort herrschenden Winden lässt die Temperaturen nachts bis auf 10 °C absinken, während tagsüber regelmäßig Temperaturen von über 35 °C herrschen.

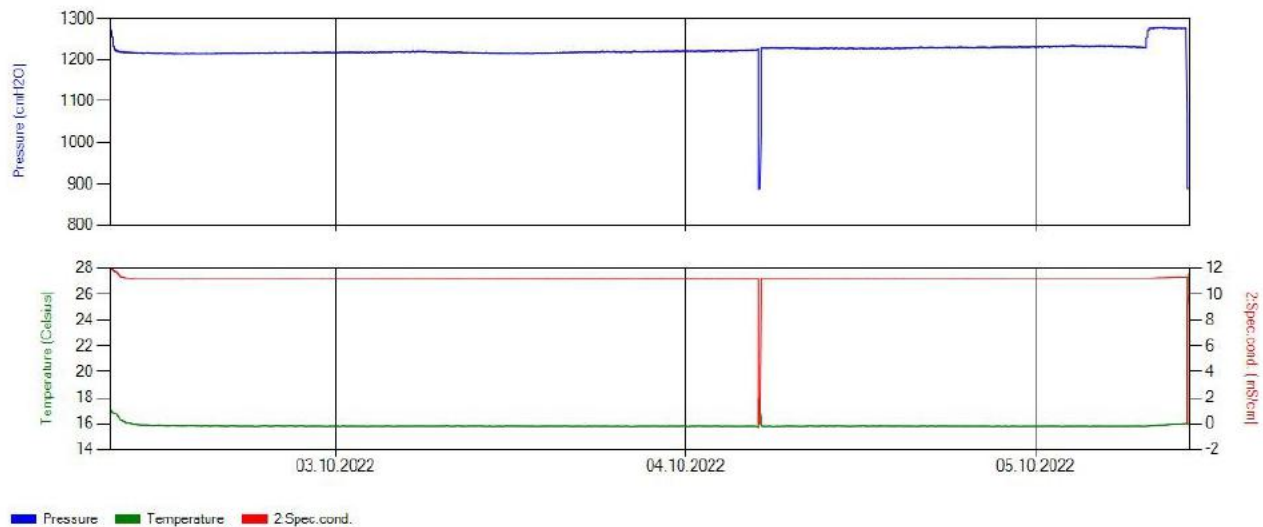


Abbildung 35: Daten des CTD-Divers während des Pumpversuches am Shah Alli Brunnen (eigene Aufnahme)

Die Messwerte des Wasserdrucks weisen eine Differenz bezüglich des atmosphärischen Drucks auf. Der Unterschied stellt dabei die Tiefe dar, in welcher der Diver im Wasser hängt. Zu Beginn ist zudem deutlich die Absenkung innerhalb des Brunnens zu sehen. Auch das Ende des Pumpversuches sowie die darauffolgende Aufspiegelung kann aus den Daten herausgelesen werden. Etwas zeitversetzt passen sich die Daten der Temperatur sowie der elektrischen Leitfähigkeit an. Die Wassertemperatur liegt im Verlauf des Pumpversuches konstant bei 16 °C. Die Messungen der elektrischen Leitfähigkeit bleiben bei rund 11,5 mS/cm während der Zeit auf annähernd demselben Niveau. Der in Abbildung 35 zu erkennende Knick am Morgen des 04.10.2022 erklärt sich dadurch, dass zu diesem Zeitpunkt die Daten des Divers ausgelesen wurden, um zu kontrollieren, ob der Datenlogger korrekt funktioniert. Dazu wurde der Diver an die Oberfläche geholt, wodurch sich der Druck von ca. 900 hPa ergibt. Gleiches Phänomen lässt sich auch am Ende des Pumpversuchs erkennen. Im Zuge der Datenauslesung fand zudem eine kleine Anpassung am Generator statt. Diese Änderung führte zu einer geringen Zunahme des Wasserspiegels. Generell ist allerdings auch unabhängig von dieser Einstellungsänderung ein geringfügig steigender Trend anhand der Daten zu erkennen. Dies bedeutet, dass die Absenkung in den drei Tagen etwas geringer wurde bzw. mehr Wasser nachgeflossen ist als abgepumpt wurde.

Ein besonderes Augenmerk soll auf die Phasen zu Beginn und zum Ende des Pumpversuchs liegen. Dabei bietet sich ein interessanter Vergleich zwischen der Tauchmotorpumpe und der leistungsstarken Bewässerungspumpe. Die Daten der Tauchmotorpumpe entstammen dem Beginn des dreitägigen Feldexperiments und basieren auf dem Diver. Bei dem Test der Bewässerungspumpe kam das Lichtlot zum Einsatz, um die Absenkung zu dokumentieren. Zwischen den beiden Versuchen lagen mehrere Tage, sodass sich der Brunnen bereits vollständig regeneriert hatte und keine Beeinflussung vorlag. Bei der Tauchmotorpumpe verringert sich der Wasserspiegel innerhalb der ersten Viertelstunde um 50 cm, wobei nach fünf Minuten bereits eine Absenkung von 40 cm vorliegt. Im Anschluss wird der stationäre Zustand erreicht. Die maximale Absenkung während der 72 Stunden betrug dabei 54 cm. Die Pumpe zur Feldbewässerung verringert den Wasserspiegel im Vergleich dazu

⁵ Ein Zentimeter Wassersäule entspricht ca. 1 mbar. Auf dem Niveau des Meeresspiegels beträgt der Luftdruck 1,013 bar bzw. 1.013 hPa. Ein Hektopascal entspricht zudem einer Wassersäule von 1,0197 cm.

erheblich, wie Abbildung 36 illustriert. Innerhalb von 20 Sekunden fällt der Wasserstand im Brunnen auf 5,15 m. Dies entspricht einer Absenkung von 2,39 m. Anschließend bleibt der Wasserstand konstant, da ausreichend Wasser aus dem Aquifer in Richtung Brunnen nachfließt. Allerdings unterscheiden sich die Werte um das Fünffache.

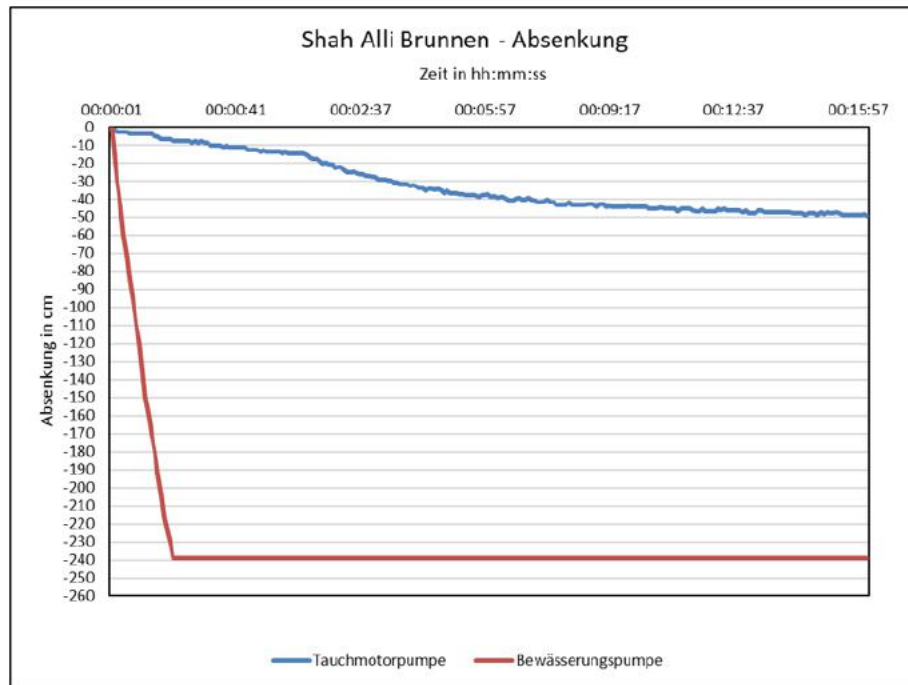


Abbildung 36: Vergleich der Absenkungskurven (eigene Darstellung)

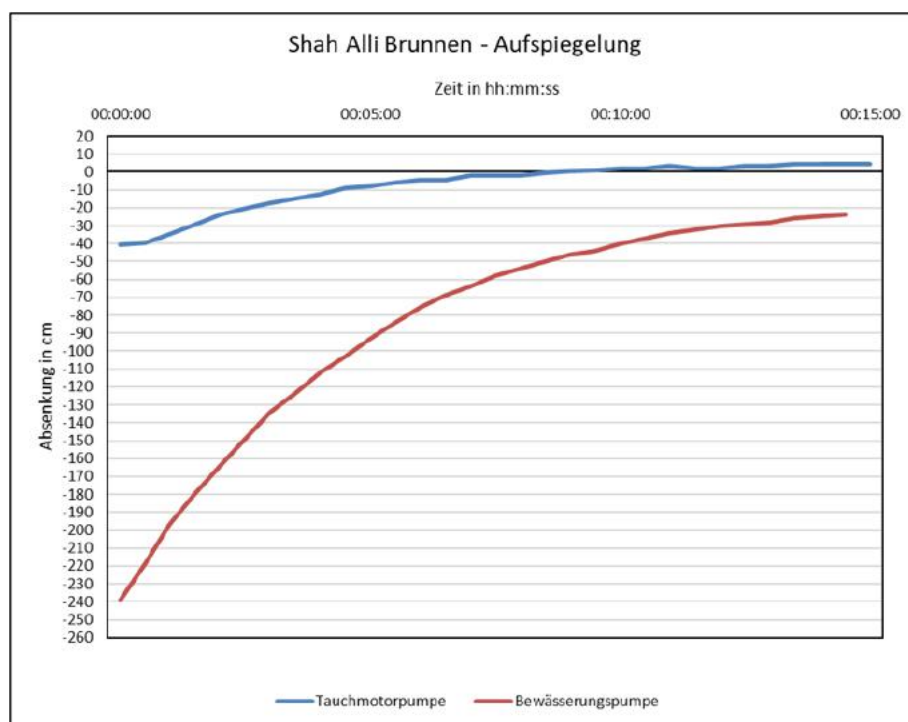


Abbildung 37: Vergleich der Aufspiegelungskurven (eigene Darstellung)

Wie bereits die Daten des Divers offenbarten, nahm die Absenkung zum Ende des Pumpversuchs hin ab. Wie in Abbildung 37 zu sehen, liegt die Absenkung nur noch bei 40 cm. Nach dem Abschalten der Pumpe steigt das Wasser innerhalb kurzer Zeit stark an. Während den ersten zwei Minuten veränderte

sich der Wasserspiegel um 20 cm. In weniger als neun Minuten erreichte der Wasserstand das ursprüngliche Niveau. Anschließend stieg der Wasserspiegel rund 5 cm darüber hinaus. Ursächlich für diesen ungewöhnlichen Verlauf der Kurve sind die Bauern der Region. Mitte Oktober endet in weiten Teilen die Feldbewirtschaftung und somit auch die Bewässerung der Agrarflächen. Durch diese geringeren Entnahmemengen verbleibt mehr Wasser im Aquifer. Dies resultiert in steigenden Wasserspiegeln im Grundwasser. Beobachtungen vor Ort zeigten zudem, dass das Flusswasser ebenfalls mehr wurde, was ein weiteres Indiz für geringere Entnahmemengen flussaufwärts darstellt. Die Kurve der Bewässerungspumpe steigt in einem etwas steileren Verlauf an, wobei der Grundwasserleiter wie bei der Absenkung träge auf die Veränderung reagiert. Dennoch steigt der Grundwasserspiegel während der ersten zehn Minuten bereits um 2,00 m an. Nach knapp einer Viertelstunde fehlen lediglich ca. 20 cm auf das Ausgangsniveau. Dementsprechend regeneriert sich der Brunnen in kurzer Zeit, sodass sich der Aquifer für eine Nutzung als Standort für die Wasserversorgung des Dorfes prinzipiell eignet.

Ebrahimabad Brunnen

Der Ebrahimabad Brunnen ist im Gegensatz zu den anderen ein Bohrbrunnen und misst eine Tiefe von über 50 m. Aufgrund der Bauweise fällt der Durchmesser des Rohres (DN 250) geringer aus als die sonst üblichen Brunnenringe mit einem Durchmesser von 1 m. Der Ruhewasserspiegel betrug vor Beginn des Pumpversuches 16,37 m. Demnach belief sich die Wassersäule auf mindestens 33,63 m. Beim Pumpversuch kam die neu angeschaffte Tauchmotorpumpe zum Einsatz. Der Strom wurde mittels Generators bereitgestellt, da sich der Brunnen auf freiem Feld nordöstlich des Dorfes Hamzehloo in rund einem Kilometer Luftlinie befindet. Die durchschnittliche Durchflussmessung ergab einen Wert von 6,67 m³/h. Die größte Absenkung betrug 56 cm. Der Verlauf des Wasserstandes ist in Abbildung 39 nachzuvollziehen.



Abbildung 38: Bohrbrunnen bei Ebrahimabad (eigene Aufnahme)

Innerhalb kurzer Zeit fällt der Wasserspiegel um rund einen halben Meter, bevor dieser in moderater Geschwindigkeit absinkt. Über den Zeitraum von 24 h bis 72 h des laufenden Pumpversuches ist ein leicht abfallender Trend zu beobachten. Die Schwankungen des Wasserspiegels betragen jedoch nur 3 cm. Demzufolge kann vom Erreichen des stationären Zustands ausgegangen werden, wobei die Messwerte gegen eine Absenkung von 55 cm konvergieren. Die Aufspiegelung findet unmittelbar nach Abschalten der Pumpe statt. Während der ersten Minute steigt das Wasser im Rohr wieder auf 10 cm unterhalb des Ausgangsniveaus an. Das schmale Rohr begünstigt dabei den schnellen Wiederanstieg. Nach der Phase des schnellen Anstiegs nähert sich der Wasserstand nur langsam den ursprünglichen Ruhewasserspiegel.

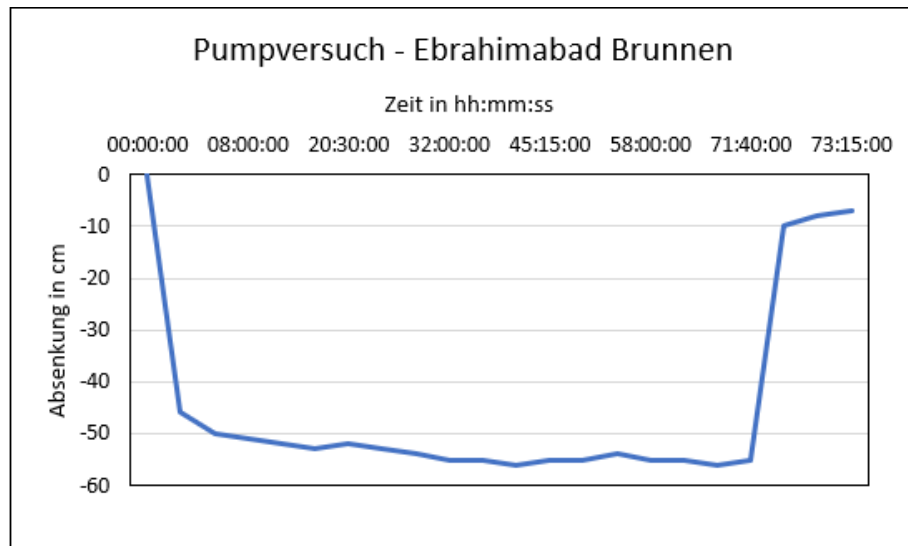


Abbildung 39: Auswertung des Pumpversuches am Ebrahimabad Brunnen (eigene Darstellung)

Hajj Aziz Brunnen

Dieser Brunnen wurde neu errichtet und bestand zum Zeitpunkt der Kampagnen 2019 noch nicht. Wie Abbildung 32 zu entnehmen, befindet sich der Brunnen nördlich von Hamzehloo in einer Entfernung von ca. 230 m. Der Brunnen, welcher eine gelotete Tiefe von 4,39 m besitzt, wurde durch die Bewohner eigenständig per Hand gegraben, um die umliegenden Felder zu bewässern. Jedoch muss der Ausbau für eine spätere Nutzung verbessert werden, da bereits jetzt ein großer Hohlraum durch Ausspülen entstand. Verursacht wurde dies auch dadurch, weil die Brunnenringe noch nicht vollständig eingebracht wurden und die obersten knapp zwei Meter offen liegen (siehe Abbildung 41). Der Ruhewasserspiegel lag während des Aufenthalts 2022 bei 1,81 m, wodurch sich eine Wassersäule von 2,58 m ergibt. Die Pumpe, welche mit Strom aus dem Dorf betrieben wurde, generierte einen durchschnittlichen Durchfluss von 2,77 m³/h.



Abbildung 40: Pumpversuch am Hajj Aziz Brunnen
(Aufnahme: N. Bagherpour Kashani)



Abbildung 41: Ausbau des Hajj Aziz Brunnens
(eigene Aufnahme)

Die Daten wurden, wie bei den Brunnen zuvor, mit Hilfe der Diver aufgenommen. Aufgrund eines technischen Defekts am CTD-Diver ist ein Auslesen des Datenloggers nicht mehr möglich, wodurch nicht mehr auf den gewonnenen Datensatz zugegriffen werden kann. Aus diesem Grund erfolgt in diesem Fall die Auswertung anhand der Kontrollmessungen des Lichtlots.

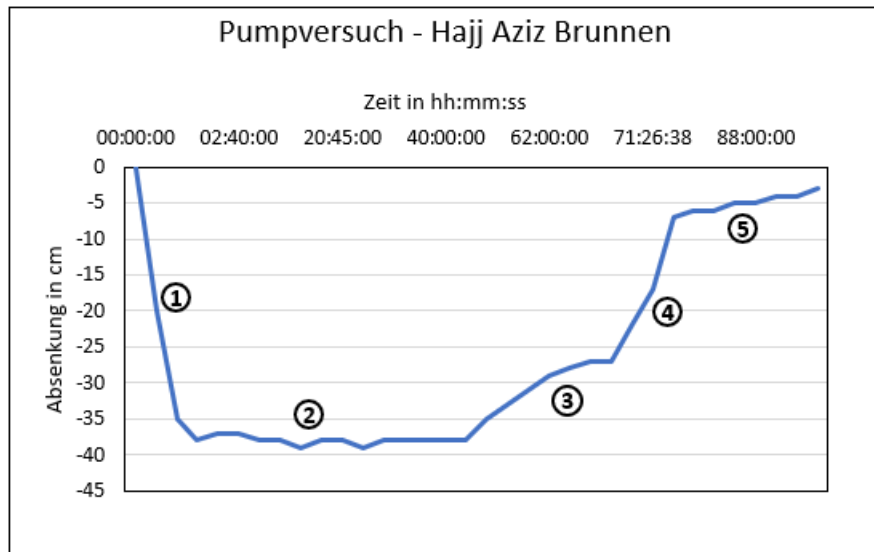


Abbildung 42: Auswertung des Pumpversuches am Hajj Aziz Brunnen (eigene Darstellung)

Der Pumpversuch am Hajj Aziz Brunnen lässt sich in fünf verschiedene Phasen untergliedern. Diese sind in Abbildung 42 gekennzeichnet. Phase 1 dauert ca. zehn Minuten und stellt die Absenkung des Wasserspiegels infolge des Pumpenstarts dar. Während der zweiten Phase bleibt die Absenkung stabil zwischen 37 - 38 cm. Diese dauert bis 44 Stunden nach Beginn des Pumpversuches. In Phase 3 steigt der Grundwasserspiegel trotz des laufenden Pumpversuchs und gleichbleibender Förderleistung stetig an. Derselbe Effekt konnte ebenfalls beim zeitgleich stattfindenden Pumpversuch am Shah Ali Brunnen festgestellt werden. Der Anstieg resultiert, wie bereits beschrieben, aus dem Ende der Feldbewirtschaftung in der Region, wodurch die Wasserentnahme geringer ausfällt. Dieser Zusammenhang lässt sich bis zum Ende des Pumpversuches beobachten, wobei der abgesenkte Wasserspiegel nur noch 27 cm beträgt. Phase 4 startet mit dem Abschalten der Pumpe nach 71 h 25 min. Wie erwartet hat dies einen schnellen Wiederanstieg des Wasserstands im Brunnen zur Folge. In den ersten 90 Sekunden erhöhte sich der Wasserstand um 10 cm. Innerhalb einer Dreiviertelstunde liegt der Wasserstand nur noch 7 cm unterhalb des Ursprungslevels. Im Anschluss (Phase 5) fließt das Wasser langsamer als zuvor nach, wobei trotz Schwankungen in der Aufspiegelung ein ansteigender Trend registriert wird.

Bei der Auswertung ist jedoch darauf hinzuweisen, dass die Messintervalle bei Divern in einem deutlich kürzeren Abstand erfolgen als bei den manuellen Messungen per Lichtlot. Deswegen sind größere Ungenauigkeiten, insbesondere bei der Aufspiegelung, zu erwarten.

Reza abaad Brunnen

Dieser Brunnen liegt nordwestlich von Hamzehloo. Im Juni 2022 belief sich die Tiefe des Brunnens, der während der Kampagnen 2019 per Hand gegraben wurde, auf 12,58 m – gemessen von der Oberkante der Brunnenringe. Zu diesem Zeitpunkt betrug die Wassersäule lediglich 20 cm, obwohl die Trockenzeit erst noch bevorstand. Während der Aufenthalte im Jahr 2019 konnte eine Wassersäule von 1,87 m gemessen werden (Eichhorn 2020). Die Diskrepanz zwischen den Messwerten basiert zum einen auf anderen Wetterbedingungen vor Ort. Denn 2019 war ein regenreiches Jahr. Im Gegensatz dazu ereigneten sich 2022 kaum Niederschläge. Zum anderen spüren die Bewohner immer stärker die Folgen des Klimawandels in der Region. Die Häufigkeit der Niederschläge nimmt immer weiter ab, wodurch die Felder mehr bewässert werden müssen. Vorhersagen, dass es bis Ende Oktober 2022 nicht mehr regnen und der Wasserstand konsequenterweise weiter sinken würde, bewahrheiteten sich. Obwohl der Brunnen im Oktober 2022 einen Meter vertieft wurde, stieg die Wassersäule im Brunnen nur auf 48 cm. Aufgrund des niedrigen Wasserstandes konnte kein Pumpversuch realisiert werden, da die Pumpe sonst Luft angesaugt hätte und zu Schaden gekommen wäre.



Abbildung 43: Reza abaad Brunnen im Juni 2022 vor den Vertiefungsmaßnahmen (eigene Aufnahme)

Konsequenzen aus den Pumpversuchen

Sowohl der Shah Alli Brunnen als auch der Ebrahimabad Brunnen eignen sich für die Nutzung als neuen Standort, da die Wasserressourcen ausreichend erscheinen. Beim Shah Alli Brunnen liegt jedoch eine geringere Mächtigkeit des Aquifers vor, sodass dort die Gefahr größer ist, dass der Brunnen in Zukunft austrocknen könnte. Über den neu gegrabenen Hajj Aziz Brunnen liegen derweil keine Daten bezüglich des Grundwasserleiters vor, da in diesem Gebiet 2019 keine geoelektrischen Messungen durchgeführt wurden. Jedoch muss der Brunnen nicht nur fertig ausgebaut, sondern auch weiter vertieft werden. Denn die Wassersäule und geringe Gesamttiefe birgt ein großes Risiko, dass nicht immer ausreichend Wasser für den dauerhaften Pumpbetrieb zur Verfügung steht. Der Reza abaad Brunnen zeigt, dass sich der Wasserstand trotz der Nähe zum Fluss innerhalb weniger Jahre grundlegend verändern kann. An diesem Standort ist eine Vertiefung zwingend erforderlich.

Mit den aufgenommenen Daten lässt sich der optimale Betriebspunkt ermitteln. Die Kalkulation beruht auf den Formeln, die in Kapitel 3.1.2 erläutert werden. In dieser Arbeit wird jedoch darauf verzichtet, weil für das Vorhaben schlussendlich nur der Reza abaad Brunnen von Bedeutung ist. Bei diesem konnte allerdings während der Aufenthalte im Jahr 2022 kein Pumpversuch durchgeführt werden. In einer weiteren Arbeit ist der optimale Betriebspunkt der Pumpe für diesen Standort zu ermitteln und der Betrieb nach diesen Erkenntnissen zu planen.

4.3. Analysen der Wasserproben

Neben der Ergiebigkeit der Brunnen spielt auch die jeweilige Rohwasserqualität eine entscheidende Rolle, welcher Brunnen sich am besten für die Trinkwasserversorgung anbietet. Dazu nahmen Mitarbeitende der regionalen Wasserbehörde Proben, die in einem Labor analysiert wurden. Diese Analyse gibt Aufschluss über die notwendigen Aufbereitungsmaßnahmen. Bereits im Jahr 2019 erfolgte eine Probenahme und Analyse der Brunnen. Die Werte werden nun miteinander verglichen. Zudem soll sichergestellt werden, ob das präferierte Konzept ohne Änderungen umgesetzt werden kann. Die aktuellen Grenzwerte Irans stellte das Labor zur Verfügung. Diese sind in die physikalisch-chemischen Anforderungen (IR 1053), welche auch Indikatorparameter wie den pH-Wert oder die elektrische Leitfähigkeit umfassen, und den mikrobiologischen Parametern (IR 1011) unterteilt. Die folgende Tabelle 3 spiegelt die Ergebnisse wider.



Abbildung 44: Probenahme
(eigene Aufnahme)

Tabelle 3: Ergebnisse der Wasseranalysen (eigene Darstellung mit Daten aus IR 1011; IR 1053; Eichhorn 2020)

Parameter	Einheit	Grenz- wert	Reza abaad Brunnen		Shah Alli Brunnen		Ebrahimabad Brunnen		Hajj Aziz Brunnen
			2019	2022	2019	2022	2019	2022	2022
Temperatur	°C	-	23,6	24,2	23,2	23,3	23,1	21,4	23,3
pH-Wert	-	6,5–9,0	7,55	7,14	7,47	7,50	7,61	7,55	6,97
Trübung	NTU	5	1,19	4,62	0,72	0,59	0,38	0,50	0,72
EC	µS/cm	-	12.330	15.440	11.066	11.010	9.420	10.250	21.700
TDS	mg/l	1.500	8.220	8.646	7.377	6.166	6.280	5.740	12.152
Ca	mg/l	300	712,8	775,3	720,6	656,0	487,8	660,5	1.407,5
Mg	mg/l	30	154,6	644,5	118,4	470,1	137,4	486,1	791,5
Na	mg/l	200	1.641	2460	1.465	1.519	1.334	1.422	3.697
K	mg/l	12	17,85	21,5	12,7	13	11,4	17,5	38,5
NH ₃	mg/l	1,4	0,3	4,31	0,25	4,17	2,2	4,45	4,06
SO ₄	mg/l	400	1.237	1.022	1.149	947	1.069	1.180	1.710
Cl	mg/l	400	3.748	4.559	3.286	3.039	2.759	2.646	6.638
NO ₃	mg/l	50	15,75	8,04	19,19	20,11	8,13	30,09	5,51
NO ₂	mg/l	3	0,02	-	0,01	-	0,05	-	-
F	mg/l	1,7	1,33	1,4	1,14	1,21	0,73	1,4	1,6
CO ₃	mg/l	-	-	0	-	0	-	0	0
HCO ₃	mg/l	-	-	355,75	-	261,08	-	220,09	371,61
CaCO ₃	mg/l	500	-	2.846	-	2.098	-	2.165	3.608

Erläuterungen zu den einzelnen Parametern sind Eichhorns Arbeit zu entnehmen. Die rot markierten Werte in Tabelle 3 verweisen auf deutliche Überschreitungen hinsichtlich der geltenden Grenzwerte. Aber auch andere Parameter liegen oberhalb der definierten Grenzwerte, bedingen sich allerdings zum Teil gegenseitig. Die erhöhten Werte müssen bei der Aufbereitung beachtet werden, um den Dorfbewohnern das Trinkwasser in ausreichender Qualität zur Verfügung zu stellen. Mögliche Ursachen für die hohen Werte einiger Parameter werden im Folgenden erörtert.

Die **Trübungswerte** werden in allen Analyseproben eingehalten. Dennoch liegt der Wert beim Reza abaad Brunnen nahe an der Grenze und deutlich über dem Niveau der anderen Brunnen. Dies liegt

an den zum damaligen Zeitpunkt parallel stattfindenden Vertiefungsarbeiten. Die Entnahme der Wasserproben ereignete sich nicht wie üblich während eines Pumpversuches, sondern während des Abpumpens des im Brunnen stehenden Wassers. Dies erklärt die höhere Schmutzfracht im Wasser.

Die Überschreitung der **elektrischen Leitfähigkeit** (EC) und des **TDS-Gehaltes** überrascht nicht. Beide Werte sind auf den hohen Salzgehalt im Gestein bzw. im Grundwasser zurückzuführen. Der extrem hohe Wert beim Hajj Aziz Brunnen schließt den Brunnen für eine Nutzung als Trinkwasserquelle nahezu aus, da hierbei die Membranen zu stark belastet werden. Der Wert ist doppelt so hoch wie beim Shah Alli Brunnen. Auch beim Reza abaad Brunnen liegt ein Anstieg im Vergleich zu 2019 vor. Dies lässt sich durch den gesunkenen Wasserstand erklären, da die Konzentration in einem geringeren Volumen steigt. Aufgrund des hohen Salzgehaltes ergeben sich zwangsläufig auch erhöhte Werte für die beiden Parameter **Natrium** und **Chlorid**.

Die Analyse zeigt einen hohen Anteil an **Magnesium**, **Calcium** und **Calciumcarbonat** (CaCO_3) und somit härtebildenden Inhaltsstoffen. Insbesondere CaCO_3 belegt eine hohe Kalkabscheidung. Ablagerungen führen zum Zusetzen der Rohrleitungen und Armaturen, wodurch sich der Strömungswiderstand in den Leitungen erhöht. Gleichzeitig resultiert ein Druckverlust im System, den die Pumpe durch einen höheren Energiebedarf ausgleichen muss. Dementsprechend ist eine Enthärtung des Wassers im Zuge der Aufbereitung sinnvoll.

Auch **Ammonium** (NH_3) überschreitet bei allen Analysen im Jahr 2022 den Grenzwert. Dieser konnte drei Jahre zuvor bei zwei der drei beprobten Brunnen eingehalten werden. Meist verursachen Düngemittel, die in der Landwirtschaft zum Tragen kommen, oder tierische Abbauprodukte erhöhte Werte. Alle vier Brunnen liegen mitten in Agrarflächen, die häufig als Weideland mitgenutzt werden. Die Probenahme fand gegen Ende der Feldbewirtschaftung statt. Weil die Brunnen – abgesehen vom Ebrahimabad Brunnen – alle offen verbaut sind, bilden diese potenziell direkte Eintrittspfade für Schadstoffe. Alternativ gelangen Rückstände über die Einbringung in den Boden und von dort in das Grundwasser. Dieser Prozess dauert jedoch weitaus länger. Zudem verändert sich auch hier die Konzentration im Grundwasser, wenn die Stoffe aufgrund des niedrigeren Wasserstandes in einem anderen Verdünnungsverhältnis stehen.

Des Weiteren liegt der **Sulfatwert** (SO_4) oberhalb des iranischen Grenzwertes. Häufig löst sich dieser aus gipshaltigem Gestein. Bei Ebrahimabad ist ein Abbauggebiet für Gips noch in Betrieb. Somit befindet sich dieses in unmittelbarer Nähe zum Untersuchungsgebiet und beeinflusst dieses direkt.

Wegen des hohen Salzgehalts im Grundwasser liegen keine **mikrobiologischen Verunreinigungen** in den Wasserproben vor. Dies betrifft sowohl Viren und Bakterien als auch andere Mikroorganismen.

Nach Auswertung der aktuellen Analysen ist keine Anpassung des zugrundeliegenden Konzepts aus dem Jahr 2019 notwendig. Die Umkehrosmose bleibt somit weiterhin zentraler Bestandteil der Wasseraufbereitung in Hamzehloo. Infolge des erhöhten TDS-Gehalts ist es jedoch möglich, dass sich die Lebensdauer der Membranen reduziert und diese häufiger ersetzt werden müssen.

4.4. Endgültige Wahl des Brunnens zur Wasserförderung

Um die Arbeiten des Projekts fortzusetzen, bedarf es einer finalen Entscheidung, welcher Brunnen für die Realisierung des Projektes verwendet wird. Deshalb erfolgt eine Abwägung aller Faktoren.

Der **Ebrahimabad Brunnen** stellt aus ingenieurstechnischer Sicht den optimalen Brunnen dar. Dennoch spricht das soziale Konfliktpotenzial klar gegen eine Nutzung dieses Brunnens. Die Dorfbewohner Hamzehloos befürchten, keine Kontrolle über die tatsächliche Wassernutzung zu besitzen, selbst wenn diese vertraglich festgehalten wird. Zudem müssen alle Grundstückseigentümer

dem Bau der Trasse zustimmen. Dies gestaltet sich jedoch schwierig. Aufgrund der sozialen Problematiken und um zukünftige Konflikte von Beginn an zu vermeiden, scheidet dieser Brunnen aus.

Der neu errichtete **Hajj Aziz Brunnen** besitzt standorttechnische Vorteile bezüglich der Nähe zum Dorf. Außerdem sprechen die unproblematischen Eigentumsverhältnisse für eine Nutzung des Brunnens, da auch der Leitungsbau keine Komplikationen bereithält. Der Brunnen liegt jedoch direkt hinter einer Biegung des Flusses (siehe Abbildung 32). Dies erfordert massive Hochwasserschutzmaßnahmen, die den Kostenrahmen des Projekts überschreiten sowie den Bewohnern und ausführenden Baufirmen nur schwer zu vermitteln sind. Außerdem liegt der TDS-Gehalt, wie die Analysen belegen, deutlich über dem Niveau der anderen Brunnen. Dementsprechend muss die Membran in kürzeren Zeitabständen ersetzt werden, wodurch sich zudem der kostendeckende Wasserpreis erhöht. Des Weiteren liegt noch keine Genehmigung für diesen Brunnen vor. Dies könnte bei den beteiligten Behörden zu einer Zeitverzögerung führen. Viele Argumente sprechen gegen diesen Brunnen, weshalb dieser schlussendlich nur die dritte Wahl darstellt.

Beim **Shah Alli Brunnen** liegen kaum Bedenken hinsichtlich des Brunnens vor, da die Pumpversuche gezeigt haben, dass ausreichend Wasser aus dem Aquifer nachströmt. Das Problem hierbei ist die Doppelnutzung des Brunnens. Denn an diesem Standort muss auch in Zukunft Wasser sowohl für die Feldbewässerung als auch zur potenziellen Trinkwassernutzung bereitgestellt werden. Denn der Eigentümer wird auch zukünftig die Bewässerung seiner Agrarflächen mit Hilfe dieses Brunnens durchführen, da dies seine Lebensgrundlage darstellt. Seine derzeit genutzte Pumpe ist erheblich leistungsstärker als die Tauchmotorpumpe, welche bei der Trinkwasserversorgung zum Einsatz kommt. Hinzu kommen Aussagen der Dorfbewohner, dass auf mögliche Zusagen hinsichtlich einer gemeinsamen Nutzung, welche die Wasserversorgung des Dorfes priorisiert, kein Verlass sei. Dies bietet ein großes Konfliktpotenzial zwischen den Bewohnern Hamzehloos. Für den Brunnen lag in der Vergangenheit bereits eine Genehmigung vor. Diese müsste demnach nur aktualisiert bzw. verlängert werden.

Beim **Reza abaad Brunnen** überwiegen zum Zeitpunkt der Kampagnen technische Komplikationen. Erst wenn eine Vertiefung des Brunnens erfolgreich durchgeführt wurde, ist eine ausreichende Wassersäule auch während der Trockenzeit vorhanden. Dennoch sollte hier unbedingt ein Pumpversuch die Annahmen bestätigen. Die ursprünglichen Problematiken aufgrund der Eigentümerverhältnisse konnten mittlerweile ausgeräumt werden. Deshalb ergeben sich aufgrund der Lage keine anderen Schwierigkeiten. Lediglich sollte in diesem Fall abgeklärt werden, dass zukünftig keine Doppelnutzung bzw. Feldbewässerung mit diesem Brunnen stattfindet.

Die Argumentation konzentriert sich nicht nur auf die ingenieurstechnische Sicht, sondern bezieht auch die sozialen Konfliktpotenziale mit ein. Da der Großteil der Brunnen nach bautechnischen Anpassungen für eine Nutzung infrage kommt, steht bei der Entscheidung primär die soziale Komponente im Vordergrund. Hier stellt sich der Reza abaad Brunnen als optimale Lösung heraus, da hier keinerlei Spannungen zu erwarten sind und die Nutzung mit dem Grundstückseigentümer vertraglich geklärt ist. Deshalb fällt die finale Entscheidung zur Wasserförderung auf den Reza abaad Brunnen. Dieser muss nun vertieft werden.

4.5. Vertiefung des Reza abaad Brunnens

Aus den bereits erläuterten Gründen bedarf es einer Vertiefung des favorisierten Brunnens. Dabei soll von Beginn an keine weitere Limitierung der Wasserförderung infolge einer unzureichenden Vertiefung akzeptiert werden. Denn einerseits erhöht sich die Wahrscheinlichkeit eines sinkenden Grundwasserspiegels als Konsequenz des Klimawandels. Andererseits wird in Zukunft ein steigender Wasserbedarf prognostiziert, weil die Bevölkerung im Dorf durch Zuzüge zunimmt. Ebenso müssen bei den geplanten Tourismusvorhaben zusätzliche Ressourcen zur Verfügung stehen. Weiterhin ist mit fortschreitender Technologisierung und einem höheren Standard auch ein steigender Verbrauch

zu beobachten. Aus diesen Gründen soll die Brunnenvertiefung so groß wie möglich ausfallen, um das Ziel der nachhaltigen und langfristigen Bereitstellung von Trink- und Brauchwasser nicht zu gefährden.

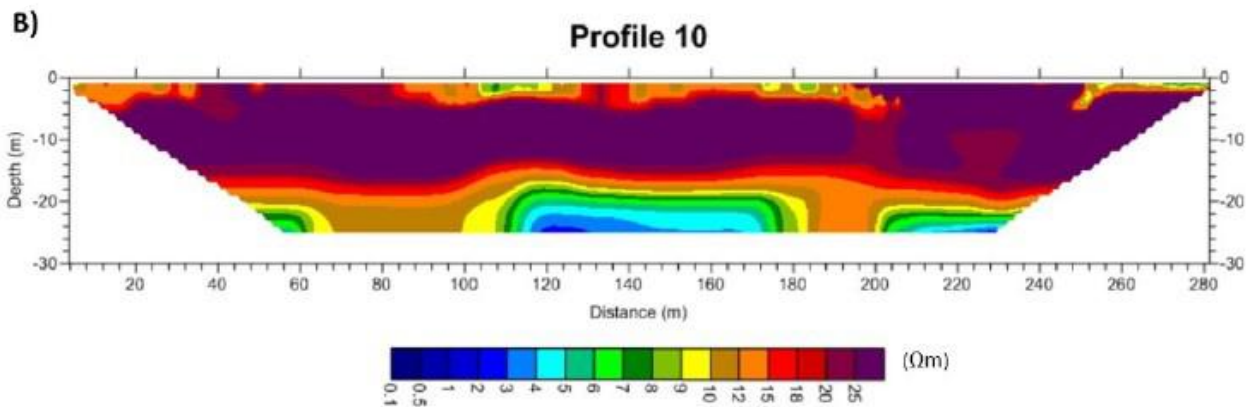


Abbildung 45: Bodenzusammensetzung nahe des Reza abaad Brunnens (Pfingsthorn 2020)

Die Ergebnisse der geoelektrischen Messungen aus dem Jahr 2019 liefern den Projektbeteiligten detaillierte Erkenntnisse für die Vertiefung des Reza abaad Brunnens. Dieser liegt in Abbildung 45 bei 220 m. Im oberen Bereich unterhalb der Geländeoberkante (GOK) befindet sich eine Schicht aus Kies und Sand. Die bläulichen Schichten im unteren Abschnitt stellen eine Lehmschicht aus sandigem Ton und somit eine wasserstauende Schicht dar. Dies grenzt die Mächtigkeit des Aquifers ein und bedeutet, dass nur eine Vertiefung bis maximal 20 m unter GOK Sinn ergibt. Die Idee, einen zweiten Brunnen (im Querschnitt bei 80 m) zu graben, musste verworfen werden, da sich die Eigentümer bereits zuvor vehement gegen das Projekt stellten.

Für die Brunnenvertiefung lag ursprünglich lediglich eine Genehmigung für Handgrabungen vor. Für die Arbeiten im Brunnen musste das Wasser dauerhaft abgepumpt werden. Allerdings rutschten die oberen Brunnenringe nicht nach, wodurch sich die Vertiefung schwierig gestaltete. Auch das Einbringen kleinerer Brunnenringe führte nicht zum Erfolg. Stattdessen schwemmte der starke Wasserzufluss das feine Material direkt in das Brunneninnere, bevor die Ringe nachrutschen konnten. Dies bewirkte einen Hohlraum hinter den Brunnenringen, sodass dieser erst wieder mit Flussteinen verfüllt werden musste, um eine sichere Arbeitsumgebung zu gewährleisten. Aufgrund der erheblichen Probleme während der Brunnenvertiefung, erteilte die Obere Wasserbehörde gegen Ende des Jahres 2022 doch noch eine offizielle Bohrgenehmigung. Diese ermöglicht es, einen Bohrbrunnen bis zu einer Tiefe von 20 m an diesem Standort zu errichten.

Das Stahlrohr mit DN 300 ist insgesamt 18 m lang und besteht aus drei verschiedenen Teilelementen, die aus Transportgründen erst vor Ort zusammengeschweißt wurden. Die Gesamtlänge reizt das Potenzial des Brunnens nicht vollständig aus, da die Daten der Geoelektrik Ungenauigkeiten aufweisen können und das Eindringen in die bindige Schicht unbedingt vermieden werden soll. Trotz des Sicherheitsfaktors ergibt sich eine ausreichende Wassersäule im Brunnen. Das Stahlrohr gliedert sich in drei verschiedene Bereiche. Die obersten ca. 12 m bestehen aus einem Vollwandrohr. Der Brunnen soll jedoch mit dem Brunnenkopf rund 10 cm oberhalb der Bodenplatte innerhalb des Brunnenhauses abschließen, um den Zugang sowie eine problemlose Wartung zu ermöglichen. Daran schließen 5 m Filterrohr an. Dies bedeutet, dass in diesem Bereich das Rohr Schlitze aufweist. Die Länge der Schlitze variiert dabei zwischen 20 cm und 40 cm. Die Breite beläuft sich derweil auf ca. 0,75 cm. Die Schlitze, welche mit der Flex oder dem Schweißbrenner entstanden, sind rundherum

versetzt angeordnet und ermöglichen das Eindringen des Grundwassers in das Brunnenrohr. Die untersten 90 cm bilden den Pumpensumpf⁶ und sind deshalb erneut als Vollwandrohr verbaut.

Im oberen Abstand bleibt der handgegrabene Brunnen mit den eingebrachten Betonringen erhalten. Der entstehende Hohlraum zwischen Brunnenrohr und Brunnenringen muss mit geeigneten Filterkies verfüllt werden, um die Standfestigkeit des Rohres sicherzustellen. Die Verfüllung des sog. Ringraums erfolgt mit grobem Kies, wobei darauf zu achten ist, dass dieser einen größeren Durchmesser als die Schlitzweite aufweist. Dafür können auch lokale Flusssteine genutzt werden, um Kosten einzusparen. Alle verwendeten Materialien dürfen jedoch nicht das Grundwasser negativ beeinträchtigen (DVGW W 123).

Die Brunnenvertiefung basiert auf dem Rammverfahren. Dabei wird das Rohr mit Hilfe von Low-Tech-Hilfsmitteln in den Untergrund gerammt. Die Brunnenbauer arbeiten mit Gewichten, die mittels Seilzugs auf die Rohroberkante (ROK) geschlagen werden. So wird das Stahlrohr sukzessive in den Boden eingebracht. Im Anschluss erfolgt das Klarspülen bzw. das Entwickeln des Brunnens (ebd.). Diese Arbeiten nutzen Über- bzw. Unterdruck, um das Feinmaterial auszuschwemmen. In Hamzehloo wurde dafür jedoch keine klassische Pumpe verwendet, sondern ein Kolben mit beweglichen Klappen. Dadurch sammelt sich im Hohlzylinder Wasser, das mit dem Hohlzylinder bei geschlossener Klappe per Seilzug an die Oberfläche gebracht wird. Anschließend öffnet sich die Klappe, wodurch das Wasser außerhalb des Brunnens abfließen kann. Um das Eindringen von Fremd- und Schadstoffen zu verhindern, wurde übergangsweise eine Stahlplatte an das obere Rohrende geschweißt. Die folgenden Abbildungen zeigen die Arbeiten während der Brunnenvertiefung sowohl bei den Handgrabungen als auch beim Rammverfahren.



Abbildung 46: Sicherung der Brunnenarbeiter per Seilwinde (eigene Aufnahme)



Abbildung 47: Eimerweise Förderung des Materials während der Handgrabung (eigene Aufnahme)

⁶ Ein Pumpensumpf ist im Ausbau notwendig, weil der Aquifer eine geringe Mächtigkeit besitzt, wodurch die Pumpe nicht näher an der Oberfläche angebracht werden kann. Im Pumpensumpf ist die Wahrscheinlichkeit von Ablagerungen, wie Sand, Trüb- und Schwebstoffen, höher. Dies kann jedoch verursachen, dass während des Anfahrens der Pumpe trübstoffhaltiges Wasser gefördert wird. (DVGW W 123)



Abbildung 48: Ablassen der kleineren Brunnenringe
(eigene Aufnahme)



Abbildung 49: Ablassen des Brunnenarbeiters für die
Handgrabungen (eigene Aufnahme)



Abbildung 50: Schweißen und Schlitten des Rohres
(Aufnahme: H. Zifar)



Abbildung 51: Positionierung des Brunnenrohres
(Aufnahme: H. Zifar)



Abbildung 52: Aufstellen des Bohrgeräts
(Aufnahme: H. Zifar)



Abbildung 53: Nahaufnahme des Bohrgeräts
(Aufnahme: H. Zifar)

5. Generierung eines digitalen Zwillings des Dorfes Hamzehloo

Der folgende Abschnitt beinhaltet die Modellierung des Dorfes und dessen nähere Umgebung. Die digital erstellten Detailbauten der Wasserversorgungsinfrastruktur werden erst im Nachhinein in das bestehende Dorf importiert. Für die Generierung des digitalen Zwillings dienen Aufnahmen aus den beiden Kampagnen aus dem Jahre 2022 als Grundlage, die somit den aktuellen Stand des Projektes widerspiegeln.

5.1. Topografie

Für die Modellierung des Dorfes, dessen Umgebung und der Topografie kommt das Programm InfraWorks zum Einsatz. Denn in diesem Programm können die Geländedaten optimal eingegliedert werden. Für den Import eines digitalen Geländemodelles (DGM) ist der *Model Builder* zu verwenden. Die Geländedaten stellt das Programm mit Hilfe der frei verfügbaren Datenbank von OpenStreetMap zur Verfügung. Zunächst muss in der sich öffnenden Weltkarte die richtige Region mit dem Untersuchungsgebiet gefunden werden. Die aufgenommenen GPS-Daten erleichtern diesen Vorgang. Anschließend ist eine rechteckige Fläche im DGM zu markieren, welches final exportiert und im Modell des Dorfes Hamzehloo genutzt werden soll. Dabei ist darauf zu achten, dass das DGM alle relevanten Standorte sowie verschiedene Orientierungspunkte der Umgebung enthält. Damit das Modell überschaubar bleibt, bilden die Verbindungstraßen im Norden und Westen die Grenzen. Östlich endet das DGM auf Höhe des Dorfes Ebrahimabad, sodass der Shah Alli Brunnen im Modell enthalten ist. Im Süden reicht das DGM bis zur Ausgrabungsstätte. Abbildung 93 im Anhang illustriert das Untersuchungsgebiet und dessen Grenzen aus der Vogelperspektive.

Aus topografischer Sicht fällt im Modell insbesondere der Douzlakh auf. An dessen Fuße liegt das Dorf Hamzehloo. Im südlichen Teil des Berges befindet sich das ehemalige Salzbergwerk und die heutige Ausgrabungsstätte. Das DGM bildet sehr gut das Gefälle zwischen den einzelnen Standorten ab, jedoch variieren die Höhenangaben zwischen dem DGM und den vor Ort aufgenommenen GPS-Daten. Die lokalen Höhendaten weisen dabei eine bessere Genauigkeit auf als die von OpenStreetMap bereitgestellten Daten.

Das DGM basiert auf dem Benutzerkoordinatensystem LL84. Die X- und Y-Koordinaten werden dabei in Längen- und Breitengrad angegeben und dienen der exakten Standortlokalisierung der erstellten Geometrie. Das Koordinatensystem kann im Nachhinein nicht mehr verändert werden. Deshalb müssen Nutzende v. a. dann darauf achten, dass alle Modelle auf Grundlage desselben Koordinatensystems entstehen, wenn durch Dateimport mit verschiedenen Programmen gearbeitet wird.

5.2. Gebäude

Für Deutschland und andere Regionen umfasst das Geländemodell von OpenStreetMap ebenfalls die Bauwerke. Für die ländliche Region Irans liegen diese Daten allerdings nicht vor. Aufgrund dessen erfolgt die Modellierung der Gebäude manuell. Für eine bessere optische Darstellung und der Realisierung des potenziellen Wachstums des Dorfes werden die Häuserruinen im digitalen Zwilling aufgewertet und als vollwertige Bauten visualisiert. Außerdem wird zwischen der traditionellen und der modernen Bauweise unterschieden. Die Modellierung wird anhand von Beispielen erläutert.

Um ein Gebäude hinzuzufügen, muss der User die Funktion *Gebäude* im Reiter *Erstellen* auswählen. In dem sich öffnenden Fenster sucht der Nutzer den passenden Zeichnungsstil aus. Dieser entspricht der im Modell sichtbaren Fassade und beinhaltet beispielsweise Fenster und Türen. Für Hamzehloo fällt die Entscheidung auf den Stil *Lorenzo*, da dieser sehr schlicht ausfällt und den Bedingungen vor Ort am besten entspricht. Für die älteren Bestandsgebäude in typischer Lehmbauweise wird eine rot-

braune Farbgebung der Außenwände und Dächer festgelegt. Bei den neu errichteten Häusern wird eine graue Farbe für die Wände gewählt. Für das Dach kommt eine silber-graue Musterung zum Einsatz, um die Aluminiumbeschichtung zu verdeutlichen. Die gleiche Form wird auch bei den Lehmhäusern verwendet, die über ein Trapezblechdach verfügen. Generell sind sämtliche Häuser Hamzehloos mit einem Flachdach ausgestattet. Dementsprechend erfolgt die Modellierung der Gebäude mit Hilfe von Quadern, ohne zusätzliche Höhenpunkte für alternative Dachformen einzufügen. Die Mauern, welche die Höfe vom Dorfplatz abgrenzen, sind als sehr schmale Gebäude in Backsteinoptik modelliert. Denn die Software InfraWorks beinhaltet zwar bei den *Stadtmöbeln* Zäune, jedoch gibt es keine einzelnen Bauteile wie Wände oder Mauern.



Abbildung 54: Ausschnitt der Dorfmitte (eigene Darstellung)

Die Grundfläche der Gebäude legt der User selbst fest, indem manuell Punkte gesetzt werden. Dadurch können die Formen entsprechend den realen Gegebenheiten vor Ort modelliert werden. Um die zentralen Bauwerke auf einer ebenen Fläche zu modellieren, muss das DGM angepasst werden. In InfraWorks geschieht dies über verschiedene Layer, deren Grundfläche ebenfalls mit Punkten abgesteckt wird. Diese Punkte können jedoch im Gegensatz zum Koordinatensystem im Nachhinein individuell geändert werden. Das Ziel ist es, eine ebene Fläche zu schaffen, weshalb für alle Punkte derselbe Z-Wert eingetragen wird. Dieses Vorgehen ändert jedoch auch die unmittelbare Umgebung der Layer, was sich durch die Bildung kraterähnlicher Veränderungen in der Topografie äußert. Diese sind besonders dann zu sehen, wenn der Höhenunterschied zwischen naheliegenden Bauten groß ausfällt. In Abbildung 54 sind die Krater am oberen Rand zu erkennen. Um das Gelände so wenig wie möglich zu beeinflussen, wird bei den vielen kleinen Häusern in steiler Hanglage auf die Begradigung mit Hilfe des Layers verzichtet. Stattdessen werden die Gebäude zum Teil in den Berg hineinversetzt. Die Gebäudehöhen variieren dabei zwischen zwei und vier Metern, um das Dorfbild so realistisch wie möglich darzustellen.

5.3. Besucherzentrum

Das Besucherzentrum basiert auf drei Säulen: Aufklärung, Tourismus und Fortbildung. Das Thema Aufklärung bezieht sich primär auf die Wassernutzung. Insbesondere die ländlichen Regionen Irans leiden unter Wasserstress und -mangel, weshalb sich der Fokus auch auf den nachhaltigen Umgang mit Wasser und den Folgen des Klimawandels richtet. Die Informationen konzentrieren sich dabei v. a. auf die Schwierigkeiten im Umgang mit salzhaltigem Grundwasser und wie dieses in der Landwirtschaft sinnvoll eingesetzt werden kann. Ziel ist es, ein besseres Bewusstsein hinsichtlich der

Problematik zu schaffen. Als Zielgruppe der Sensibilisierung wurden neben den Landbesitzern und Dorfvorstehern aus der Umgebung auch iranische Behörden, Schulklassen sowie interessierte Touristen identifiziert. Die zweite Säule bildet der Tourismus. Die Funde der Salzmannen sind einzigartig und eine Kombination mit dem Besuch der Ausgrabungsstätte stellt ein attraktives touristisches Ziel dar. Des Weiteren lässt sich die bestehende Route der Reiseveranstalter mit zusätzlichen Haltepunkten in Zanjan und Hamzehloo erweitern, wobei nicht nur die archäologische Stätte, sondern auch die faszinierende Landschaft Interesse weckt. Als drittes Standbein dient die Fortbildung. Neben Schulungen sollen auch iranische Archäologen anhand der Grabungsstätte im ehemaligen Salzbergwerk praktische Erfahrungen sammeln und sich währenddessen durch Seminare weiterbilden. (DBM et al. 2018)

Aufgrund der verschiedenen Nutzungsformen ergibt sich ein multifunktionales Gebäude. Neben dem Ausstellungsraum mit Informationstafeln und Vitrinen dient das Gebäude auch als Grabungshaus mit einem Lager und Archiv für die Funde der Ausgrabungskampagnen. Gleichzeitig ist es auch ein Bildungszentrum, in dem in einem großen Saal Vorträge sowie Schulungen durchgeführt werden können. Dieser Veranstaltungsraum soll allerdings auch den Bewohnern für Feste zur Verfügung stehen. Außerdem beinhaltet das Besucherzentrum auch ein Teehaus, um die Aufenthaltsqualität für Reisende und Touristen zu verbessern. Dies stellt nicht nur einen Ort zum Verweilen und Ausruhen dar, sondern zudem eine Einkommensquelle sowie Arbeitsplätze für die Dorfbewohner. Außerdem ist in dem Gebäude auch eine Übernachtungsstätte integriert. Diese nutzen zukünftig Touristen oder das Grabungsteam während der Kampagnen. Abbildung 55 zeigt den geplanten Grundriss des Besucherzentrums.



Abbildung 55: Grundriss des Besucherzentrums (DBM et al. 2018)

Auf Basis des Grundrisses erfolgt die Modellierung des Bauwerkes in Revit, da in dieser Software die Details besser ausgearbeitet werden können. Die Erstellung gliedert sich in vier Bereiche, wobei zwischen dem Gebäude selbst, der Innenausstattung, der technischen Gebäudeausrüstung (TGA) und der angrenzenden Topografie unterschieden wird.

5.3.1. Gebäude

Um ein neues Projekt zu starten, muss zunächst eine neue Vorlage erstellt werden. Da der Fokus auf dem Gebäude liegt, fällt die Wahl auf die Vorlage *BIM Architektur & Ingenieurbau vereinfacht*. Diese beinhaltet u. a. weniger vorgefertigte Ebenen als die Vollversion, jedoch ist die hinterlegte Fassung für die Modellierungszwecke völlig ausreichend. Im nächsten Schritt werden die Ebenen in einer Ansicht geändert, indem diese markiert werden. Im Eigenschaftenmenü können anschließend passende Namen und die gewünschte Höhe eingetragen werden, wie in Tabelle 4 exemplarisch zu sehen.

Tabelle 4: Eigenschaften der Ebenen (eigene Darstellung)

Benennung	Höhe	Erläuterung
OK DG 2	4,5 m	OK = Oberkante
UK DG 2	4,2 m	UK = Unterkante
OK DG 1	3,5 m	DG = Dachgeschoss
UK DG 1	3,2 m	EG = Erdgeschoss
UK EG	0,0 m	KG = Kellergeschoss
UK KG	-1,0 m	

Zwar liegen bei den geplanten Bauwerken keine klassischen Stockwerke vor, doch vereinfacht diese Benennung das Zurechtfinden im Programm. Die Maßeinheit ist auf Meter festgesetzt, wobei vier Nachkommastellen eine ausreichende Genauigkeit gewährleisten. Abbildung 56 zeigt eine gerenderte Außenansicht des dreidimensionalen Modells und soll die Erläuterungen der Vorgehensweise während der Modellierung nachvollziehbarer gestalten. Die Beschreibung richtet sich nach der Chronologie der Modellierung und nicht nach der Bauweise, weil so Zusammenhänge und Eigenheiten der Software besser erklärt werden können.



Abbildung 56: Außenansicht des Besucherzentrums (eigene Darstellung)

Wände

Die Wände werden im Grundriss des Erdgeschosses erstellt. Im Bereich Architektur sind die tragenden Wände zu finden. Die Dicke der Wand soll dabei in Absprache mit dem Bauunternehmer und nach der lokalen Bauweise 35 cm betragen und aus Mauerwerk bestehen. Dementsprechend wird die Basis-

wand *Ziegel 300* ausgewählt und dupliziert, weil die Wunschmaße nicht im Programm hinterlegt sind. Im Duplikat erfolgt die Anpassung an die realen Maße, indem über *Typ bearbeiten* und *Konstruktion bearbeiten* zusätzliche Schichten bzw. Änderungen bestehender Schichten eingetragen werden. Die Dicke des Sichtmauerwerks wird in der Vorlage von 30 cm auf 35 cm vergrößert und als tragende Schicht markiert. Als äußere Schicht wird Lehmputz ergänzt, innen Gipsputz. Beide belaufen sich auf 1,5 cm, wobei sowohl das Material als auch die Farbgebung individuell angepasst werden muss.

Für eine zügige Modellierung bietet es sich an, die *Kette* zu aktivieren, sodass Wände direkt im Verbund erstellt werden. Zudem soll als *Basislinie* die Innenkante der tragenden Schicht gewählt werden. Alle Wände sind gemäß dem Grundriss (siehe Abbildung 55) einzufügen. Anschließend gilt es die nichttragenden Wände im Innenbereich, die z. B. bei den Toiletten vorliegen, zu ergänzen. Hierbei kommen Wände des Typs *Ziegel 115* zum Einsatz, die innen und außen mit jeweils einer Schicht Gipsputz modifiziert sind. Die jeweiligen Abhängigkeiten bzw. Höhen können im Nachhinein bearbeitet werden. Der vordere Teil erstreckt sich von UK EG bis zur UK des ersten Dachgeschosses, während der hintere Abschnitt die zweite, leicht erhöhte Ebene des Daches umfasst.

Tragwerksstützen

Die Stützen kommen bei diesem Gebäude aus zwei verschiedenen Gründen zum Tragen: zum einen für die Absicherung des überdachten Gangs beim Innenhof, zum anderen dienen in die Wand integrierte Stützen als Erdbebenschutz. Die fünf Tragwerksstützen im Innenhof bestehen aus Stahlbeton und besitzen eine Grundfläche von 25 cm mal 25 cm. Wenn keine finanziellen Gründe dagegensprechen, ist es auch möglich, die Stützen als traditionelle Rundbögen auszubauen. Weil in Revit bei Tragwerksstützen im Gegensatz zu Wänden keine zusätzlichen Schichten ergänzt werden können, erfolgt lediglich eine optische Anpassung. Denn aus ästhetischen Gründen sollen diese ebenfalls mit einem Lehmputz versehen werden. Analog wie zuvor wird deshalb die Farbe des Materials angepasst. Als Material bleibt jedoch weiterhin der bewehrte Ort beton bestehen.

Die als Erdbebenschutz fungierenden Stützen sind in allen Ecken und Schnittpunkten von tragenden bzw. nichttragenden Wänden integriert, um die Stabilität des Gebäudes auch während seismischer Aktivitäten sicherzustellen. Die Stahlbetonstützen nehmen eine quadratische Grundfläche von 225 cm² ein und sind fest mit der Wand verankert. Die Höhe der Säulen ergibt sich aus der jeweiligen Wand. Generell bietet es sich an, alle Höhenangaben in Abhängigkeit zu den Ebenen im Eigenschaftenmenü zu definieren. Denn dies vereinfacht Anpassungen im Nachhinein, da die eingetragenen Abhängigkeiten bestehen bleiben und automatisch verändert werden, sofern die Ebene geändert wird.

Fundamente

In der Regel basieren die Tragwerkstützen im Innenhofbereich auf Einzelfundamenten. Hier wird jedoch darauf verzichtet und stattdessen auf ein durchgängiges Streifenfundament gesetzt. Denn dieses ist unkomplizierter herzustellen, aus der Konstruktion des ländlichen Hausbaus bereits bekannt und darüber hinaus fällt die Bodenversiegelung nur minimal höher als bei Einzelfundamenten aus. Streifenfundamente verbreitern die Aufstandsfläche der Wände, um die Lasten in den Baugrund abzuleiten (Dierks und Wormuth 2012). Der Winkel zur Lastausbreitung beträgt zwischen 50° und 60° (siehe Abbildung 57). Die Bewehrung liegt zudem auf einer ca. 5 cm dicken Sauberkeitsschicht, um zu verhindern, dass während des Betonierens die Bewehrung in den weichen Baugrund absinkt (ebd.). Iranische Bestimmungen erfordern außerdem eine Sandschicht als unterste Schicht.

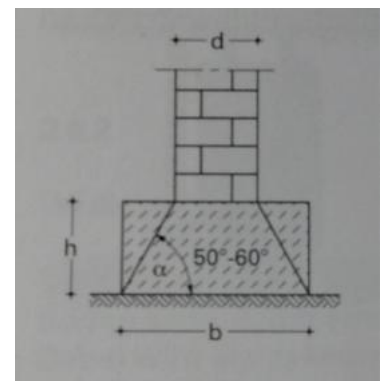


Abbildung 57: Streifenfundamente (Dierks und Wormuth 2012)

Um die Fundamente zu modellieren, muss in Revit im Reiter Ingenieurbau die Funktion *Fundament – Wand* ausgewählt werden. Anschließend markiert der Nutzer alle Wände, die auf einem

Streifenfundament stehen, wodurch Revit automatisch die Fundamente erstellt. Unterhalb der Stützen kann das Programm keine Streifenfundamente konstruieren. Deshalb wird stattdessen ein Fundament einer angrenzenden Wand markiert und dieses händisch entlang der fünf Tragwerkstützen verlängert bis der Formschluss mit der gegenüberliegenden Wand erreicht ist.

Bodenplatte

In Kombination mit Streifenfundamenten lässt sich in Revit die Bodenplatte am einfachsten mit tragenden Geschossdecken modellieren. Um die Bodenplatte an den vorhandenen Wänden auszurichten, wird das Werkzeug *Wände auswählen* genutzt. Analog zu den Streifenfundamenten müssen auch hier die Wände markiert werden, um das Bauteil zu platzieren. Es bietet sich an, die Bodenplatten in sämtlichen Räumen einzeln zu verlegen. Denn in dem Fall lassen sich diese problemlos individuell ändern, ohne zusätzliche Elemente als Fußbodenaufbau einfügen zu müssen. Die erzeugte Geschossdecke wird in Bezug auf die Ebene, auf der sie erstellt wird, nach unten versetzt.

Das Besucherzentrum verfügt über verschiedene Bereiche. Grundsätzlich bleibt der Aufbau der Bodenplatte in allen Räumen gleich, jedoch unterscheidet sich der Fußbodenaufbau leicht voneinander. Von unten nach oben verfügt die für dieses Bauwerk standardisierte Bodenplatte über vier Schichten. Als unterste Schicht wird eine 15 cm dicke Kiesschüttung eingebracht. Daran schließt eine zehn Zentimeter mächtige Sauberkeitsschicht aus unbewehrtem Ortbeton an. Als Abdichtung dient eine drei Zentimeter dicke Bitumenbahn. Diese sog. Schwarze Wanne verhindert das Eindringen von Feuchtigkeit bei erdberührten Bauteilen. Die oberste Schicht bildet bewehrter Ortbeton. Die Mächtigkeit beträgt 15 cm, wobei der Stahlbeton die tragende Schicht des Aufbaus darstellt. (Kaczmarczyk et al. 2010; Dierks und Wormuth 2012)

Daran schließen abhängig von den Räumen unterschiedliche Fußbodenaufbauten an. In den Gästezimmern kommen wie üblich Teppichböden zum Einsatz. Darunter befindet sich eine Klebstoffschicht, um ein Verrutschen des Bodenbelags zu vermeiden. In den anderen Räumen sollen Fliesen verlegt werden. Eine dünne Schicht Ausgleichsmasse schafft dafür einen ebenen Untergrund. Der Innenhof weist einen anderen Bodenaufbau auf, weil dieses Areal lediglich als Aufenthaltsfläche im Freien gedacht ist und deshalb keine hohen Verkehrslasten zu erwarten sind. Deswegen besteht hier die Bodenplatte neben der Kiesschicht aus einer zehn Zentimeter dicken Schicht Naturstein. Allerdings muss für das Wasserbecken eine tragende Fundamentplatte aus Stahlbeton eingeplant werden, da hier im gefüllten Zustand eine große Last auf diese Fläche wirkt.

Öffnungen

Das Programm Revit bezeichnet alle Türen, Fenster sowie Wanddurchbrüche als Öffnungen. Nicht alle verfügbaren Elemente sind von Beginn an in der Vorlage hinterlegt. Deshalb müssen zusätzliche Bauteile aus diesen Bereichen ins Projekt geladen werden. Dies geschieht über den Reiter *Einfügen*, indem entsprechende Türen und Fenster ausgewählt und aus der Autodesk-Familie in das Projekt geladen werden.

Die Türen sollen gemäß dem Grundriss (Abbildung 55) eingefügt werden. Eine breite, zweiflügelige Tür mit Glaselementen im Eingangsbereich wirkt einladend. Die Tür öffnet sich in einem Winkel von 120° nach außen. Zum einen wird im Gebäudeinneren Platz gewonnen, zum anderen müssen sich Fluchttüren in Fluchtrichtung und somit nach außen öffnen. Die Höhe des Türknaufs befindet sich - wie bei allen anderen Türen auch - gemäß DIN 18255 exakt 105 cm oberhalb des Bodens. Im Arbeitsbereich sowie im Seminarraum werden in Richtung Innenhof Türen mit Glaselementen an den Seiten eingesetzt. Dies soll bewirken, dass mehr Licht in die Räume scheint und ermöglicht zugleich einen Blick in den Hof. Die Türen im Innenbereich sind einflügelig in Standardmaßen (DIN 18100) geplant. Die Öffnungsrichtung ist dabei jeweils so anzupassen, dass keine Kollisionen zwischen den Türen entstehen. Darauf ist v. a. in den Bereichen der Küche sowie in den Bädern zu achten, da dort beengte Platzverhältnisse bestehen. Für die Außentüren an der Südseite müssen geeignete Türen

verbaut werden. Im Modell werden einfachheitshalber Türen desselben Typs wie im Innenbereich verwendet.

Im Gang Richtung Küche sowie in Richtung der Gästezimmer müssen Wanddurchbrüche geschaffen werden. Dabei sollen Rundbögen die traditionelle Bauweise Irans widerspiegeln. Die Maße der Höhe und Breite der bogenförmigen Öffnung lassen sich über die Funktion *Typ bearbeiten* individuell anpassen.

Alle Fenster im Gebäude verfügen über eine sog. Drehkipf-Funktion. In den Bädern fallen die Fenster jedoch aus Platzgründen kleiner aus. Zudem soll in diesen Bereichen nur Milchglas o. Ä. eingesetzt werden, sodass es nicht möglich ist, von außen durch die Fenster zu sehen. In der Küche, im Arbeitsbereich sowie im Seminarraum kommen zweiflügelige Fenster mit einem mittigen Pfosten zum Einsatz. Hierbei muss im Eigenschaftenmenü der *Wandaufbau Außen* von 16 cm auf 4 cm reduziert werden, um nur eine Tropfkante zu erhalten. In den Gästezimmern und in der Ausstellung sind Glastüren eingeplant. Auch hier ist die Tropfkante des Bauteils zu verkürzen. Ebenfalls muss im Eigenschaftenmenü die Schwelle um mindestens 5 cm angehoben werden, um Konflikte zwischen Fundament und Türaufbau zu vermeiden. Die Öffnungen an der Ost- und Westseite des Gebäudes ermöglichen insbesondere im Sommer einen regelmäßigen Luftaustausch durch Stoßlüften.

Dachaufbau

In den ländlichen Regionen Irans finden meist Flachdächer bei der Konstruktion Anwendung. Dabei ist darauf zu achten, dass ein Gefälle von fünf Grad eingehalten wird. In den Flachdachrichtlinien beträgt das Mindestgefälle 2 % (entspricht $1,1^\circ$). Aber Untersuchungen zeigen, dass diese Neigung zu gering ist, um ebene Bereiche auszuschließen, wodurch die Schadensanfälligkeit aufgrund der ungenügenden Dachentwässerung höher ausfällt (Dierks und Wormuth 2012). Die Dächer müssen statische Anforderungen hinsichtlich der Eigen-, Schnee-, Wind- sowie zusätzlicher Verkehrslasten in Form von Personen, Maschinen oder Bepflanzungen erfüllen. Das Gebäude ist nach DIN-Normen inklusive Sicherheitsfaktor geplant und gebaut, sodass die Statik gewährleistet ist. Exakte Berechnungen muss allerdings ein Statiker durchführen.



Abbildung 58: Dachaufbau aus Sandwichelementen (DIGImasaleh 2023)

Die Dachkonstruktion besteht statt einer Spannbetondecke aus Sandwichelementen. Abbildung 58 zeigt den Aufbau des Daches. Zwischen zwei Betonträgern, die eine dreiecksförmige Bewehrung aus Stahlstreben stützen, befinden sich Dämmelemente aus Polystyrol⁷, besser bekannt als Styropor. Diese sind jeweils zwei Meter lang, können allerdings auf eine beliebige Länge gekürzt werden. Oberhalb der Styroporelemente sowie in den Zwischenräumen wird eine Betondeckschicht aufgetragen. Deren Dicke variiert je nach den erwartbaren Lastfällen. Für die Dachterrasse muss dementsprechend mehr Material verwendet werden als bei einem ungenutzten Dach. Generell ist bei der Deckschicht darauf Acht zu geben, dass die Bewehrung von einer mindestens drei Zentimeter

⁷ Polystyrol als Dämmstoff kostet wenig, ist leicht und flexibel zu verarbeiten und wiegt sehr wenig. Gleichzeitig besitzt das Material einen niedrigen Wärmedurchgangskoeffizienten, d. h. sehr gute Dämmeigenschaften. Allerdings ist Polystyrol kein nachhaltiger Rohstoff, der zudem beim Rückbau hohe Mengen an Müll verursacht.

dicken Betonschicht überdeckt ist, um diese vor Witterungseinflüssen zu schützen (Kaczmarczyk et al. 2010).

Die Modellierung des Daches erfolgt in Fusion 360, da in dieser Software detailliertere Formen erstellt und die einzelnen Bestandteile besser zusammengefügt werden können. Zunächst werden die Grundflächen der Bestandteile in einer Skizze erstellt. Mit Hilfe der *Extrusion* werden die zweidimensionalen Flächen in dreidimensionale Körper umgewandelt. Dabei wird vorläufig nur ein Styroporelement mit einem einseitigen Betonträger inklusive Stahlstreben erstellt. Diese Kombination kann anschließend an die erforderliche Dachfläche erweitert werden. Beispielsweise besitzt das westliche Dach des Besucherzentrums eine Grundfläche von 7 m mal 11,6 m. Über die Funktion *Anordnung auf Pfad* kann die Anzahl der Elemente leicht an die gewünschten Maße angepasst werden. Bei diesem Beispiel reihen sich zwanzig Kombinationen aneinander. Diese lassen sich kopieren und im Abstand von zwei Metern erneut einfügen. Dieser Vorgang wird zweimal wiederholt. Die letzten Styroporelemente sollen lediglich einen Meter betragen, da die Gesamtlänge nur sieben Meter beträgt. Mit Hilfe des Werkzeugs *Drücken/Ziehen* werden die Kantenlängen auf 1 m reduziert und die überzähligen Stahlstreben entfernt. Im Anschluss erfolgt analog wie zuvor die Vervielfältigung der Bauteile. Abbildung 59 zeigt einen Ausschnitt des modellierten Daches.

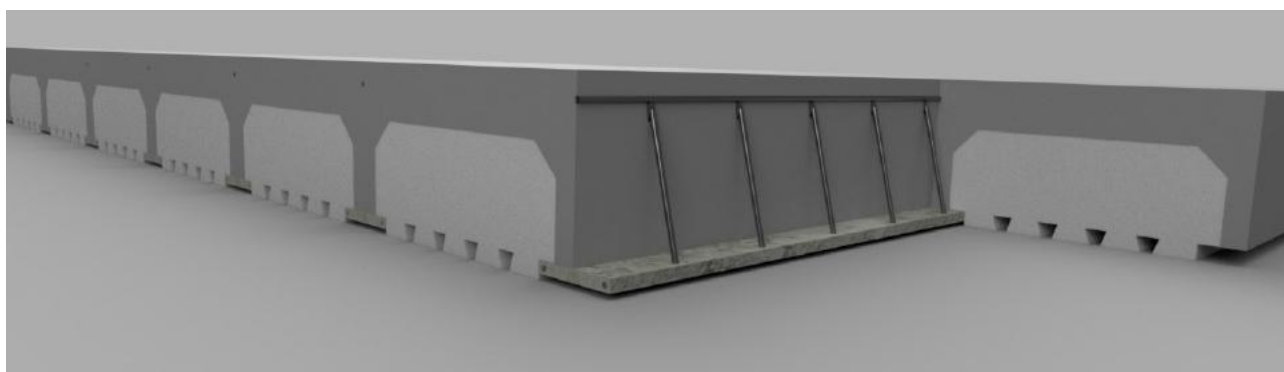


Abbildung 59: Modellierte Dachkonstruktion mit Fusion 360 (eigene Darstellung)

Für die beiden weiteren Dachflächen des Besucherzentrums wird das gleiche Vorgehen angewandt. Dabei unterscheidet sich lediglich die Grundfläche von dem erläuterten Beispiel, wodurch sich nur Änderungen in der Anzahl der kombinierten Elemente ergeben. Jede Dachkonstruktion muss in Fusion 360 exportiert und als DWG-Datei exportiert werden. Anschließend kann in Revit die Datei manuell auf die entsprechende Ebene über die Funktion *CAD importieren* in das Projekt eingefügt werden.

Als Dachumrandung ist aufgrund der örtlichen Bauweise jeweils eine Schicht bewehrter Ort beton eingeplant. Dies lässt sich entweder in Fusion 360 direkt modellieren oder in Revit in Form von Wänden oder einer Geschossdecke mit einer Öffnung umsetzen. Sofern der Fokus nur auf dem optischen Resultat liegt und mit dem Modell keine Berechnungen durchgeführt werden, kann eine vollständige Geschossdecke eingefügt werden. Denn im Schnitt bleiben die erzeugten Sandwichelemente im Dachaufbau gut erkennbar.

Zusätzlich werden im Iran üblicherweise zwei weitere Schichten als Dachabschluss verbaut. Zum einen kommt eine Abdichtung aus Bitumenbahnen zum Einsatz. Diese verhindern, dass Feuchtigkeit in die Bausubstanz und in das Innere eindringt. Zum anderen verwenden die Bewohner häufig auch eine zusätzliche Aluminiumbeschichtung, weil die direkte Sonneneinstrahlung die Dichtungsbahnen sonst spröde werden lässt und somit die dichtende Wirkung nicht mehr gewährleistet ist. Beide Schichten ragen handbreit über die Dachkante hinaus, damit keine Schäden durch seitlich einfließendes Wasser entstehen. Für die begehbare Dachterrasse soll jedoch ein anderer Aufbau Anwendung

finden. Neben einer Bitumenschicht (1,5 cm) als Abdichtung besteht der Fußbodenaufbau aus einer Ausgleichsmasse sowie Fliesen in Natursteinoptik.

Tragwerk

Um alle auf das Gebäude einwirkende Lasten sicher in den Untergrund abzuleiten, bedarf es ein Tragwerksystem. Dafür wird ein Trägersystem installiert, welches aus Stahlträgern besteht. In Revit sind IPE-Stahlträger hinterlegt, die in allen Bauten genutzt werden. Diese sog. Doppel-T-Träger besitzen ein schmales I-förmiges Profil und verfügen über Spannweiten von bis zu 12 m (DIN EN 10365). Für die Modellierung des Tragwerks ist ein automatisch erstelltes Trägersystem zu bevorzugen. Dafür wählt der Nutzer alle Wände aus, zwischen denen die Träger eingespannt und fest verankert werden. Im Anschluss wird im Eigenschaftenmenü als Verlegeregel der maximale Abstand auf 90 cm festgesetzt, da dies vom Programm als Optimum ermittelt wurde. Die Träger können jeweils in Längs- oder Querrichtung verbaut werden, wobei stets die maximalen Spannweiten ausschlaggebend sind.

Treppe

Über eine Treppe gelangen die Besucher vom Innenhof zur Dachterrasse. Dort befindet sich neben weiteren Sitzmöglichkeiten des Teehauses auch eine Aussichtsplattform, die einen Blick über das Dorf und das gesamte Tal ermöglicht. In Revit befindet sich die Funktion *Treppe* im Bereich Erschließung. Die Stufenhöhe sowie die Auftrittsfläche werden automatisch nach DIN 18065 ermittelt und berechnen sich nach der Gesamtlänge der Treppe. Diese soll in diesem Fall 5 m betragen. Die Laufbreite wird auf 1 m festgesetzt. Außerdem soll die Treppe aus massivem Ort beton mit Stufen aus Naturstein bestehen. Revit vereinfacht die Modellierung in der Hinsicht, dass lediglich die beiden Ebenen, zwischen denen die Treppe erstellt werden soll, eingetragen werden müssen. Zudem generiert die Software automatisch ein Geländer mit vertikalen Stäben, wodurch sich die Absturzgefahr insbesondere von Kindern reduziert.

Auch für die Dachterrasse selbst bedarf es eine bautechnische Absturzsicherung. Um eine Aussicht auch für kleinere Kinder zu gewährleisten, besteht die Sicherung aus zwei Baumaßnahmen. Eine 50 cm hohe, mit Lehm verputzte Betonmauer bildet den unteren Teil. Darüber wird ein Geländer installiert, sodass in Summe eine Höhe von einem Meter erreicht wird. Die Höhe der Absturzsicherung ergibt sich aus den gesetzlichen Vorschriften des Bauordnungsrechtes und der DIN 18065. Bei der Modellierung ist darauf zu achten, dass die Wandhöhe manuell eingetragen wird, da für die Oberkante keine Ebene definiert ist. In den Eigenschaften lässt sich darüber hinaus auch die Höhe des Geländers anpassen. Über die Funktion *Typ bearbeiten* wird zudem der Abstand zwischen den Pfosten bestimmt sowie die runde Form des Handlaufs und der Pfosten festgelegt.

Wasserbecken Innenhof

Wasserbecken besitzen in der iranischen Bauweise Tradition. Viele Moscheen des Landes und weitere bauliche Anlagen verfügen über solche Becken. Diese bauliche Erweiterung schafft eine angenehme Atmosphäre und verbessert die Aufenthaltsqualität in den Innenhöfen. Denn das Wasser beeinflusst das Mikroklima in der näheren Umgebung, wobei insbesondere eine kühlende Wirkung eintritt.

Um das Becken zu modellieren, wird eine 20 cm dicke und 40 cm hohe Wand als Umgrenzung erstellt. Aufgrund der hohen Last im gefüllten Zustand muss eine Fundamentplatte unter dem Becken integriert werden. Als Material kommt dabei Stahlbeton zum Einsatz. Um das Wasser zu simulieren, wird erneut ein Plattenfundament eingefügt. Das Material wird hierbei allerdings von Stahlbeton zu Wasser geändert. Außerdem muss ein Höhenversatz von 37 cm in den Einstellungen eingegeben werden, da die Bodenplatte immer nach unten versetzt wird. Dadurch erscheint im digitalen Modell ein beinahe voll gefülltes Wasserbecken.

5.3.2. Innenausstattung

Viele spezielle Bauteile liegen nicht standardmäßig in der Vorlage ab. Diese Elemente müssen wie zuvor beschrieben aus der Online-Bibliothek von Autodesk in das Projekt geladen werden. Für die bessere Sichtbarkeit bietet es sich an, einen 3D-Schnitt zu erstellen. Der Schnittbereich kann mit Hilfe von Schiebereglern an den Kanten jeweils auf die Größe der Räumlichkeiten eingestellt werden, die gerade bearbeitet werden. Das Inventar wird derweil im Grundriss platziert, während die Kontrolle im Schnittbereich erfolgt.

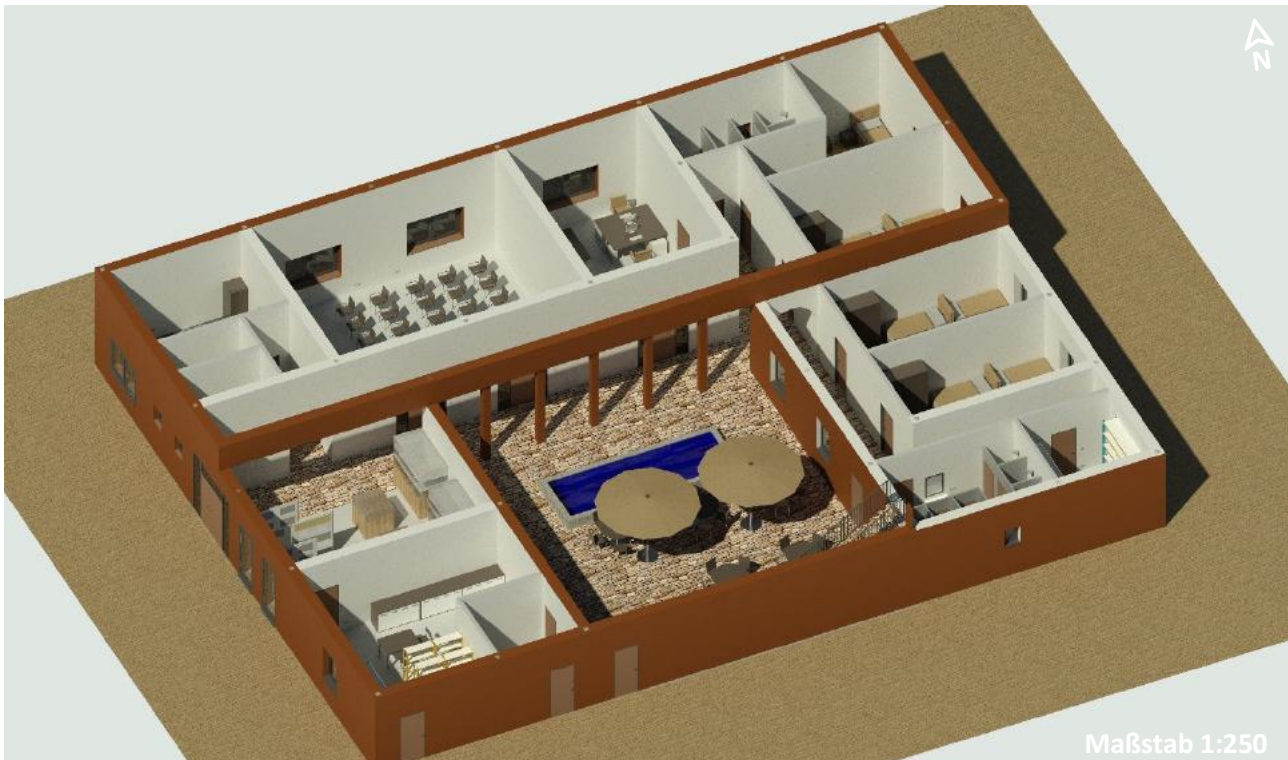


Abbildung 60: Schnitt des Besucherzentrums ohne Dach und Träger (eigene Darstellung)

Für eine zielgerichtete Modellierung empfiehlt es sich, alle Räume einzeln zu vervollständigen. Das Mobiliar ist entsprechend der angestrebten Nutzung einzufügen. Demnach werden z. B. in der Küche neben einer Küchenzeilen-Kombination auch Tisch und Stühle implementiert. Im Arbeitsbereich liegt dagegen der Fokus auch auf technischen Komponenten wie Computern und einem Kopierer. Die Gästezimmer sind als Mehrbettzimmer ausgebaut und beinhalten Betten, Schränke und Kommoden. Sowohl im Lager als auch im Archiv kommen u. a. Schwerlastregale zum Einsatz, da dort die archäologischen Funde gelagert werden. Im Eingangsbereich stehen neben Tafeln auch Vitrinen. Diese Bauteile wurden in Fusion 360 erstellt. Abbildung 94 im Anhang stellt eine potenzielle Stellwand der Ausstellung dar.

Der Aufbau der Nasszellen weicht im Modell von der tatsächlichen Umsetzung ab. Grund dafür ist, dass die in Iran verwendeten Bauteile nicht in Revit abgelegt sind. Statt einer in Europa typischen Toilettenschüssel kommen dort meist sog. Hocktoiletten vor. Aus kulturellen und hygienischen Gründen ist ebenfalls die Montage eines zusätzlichen Wasseranschlusses für einen Wasserschlauch einzuplanen. Des Weiteren verfügen die beiden größeren Bäder über Duschen, Waschbecken sowie einem Spiegel. Die Toilettentrennwände sollen aus HPL-Platten oder Ähnlichem bestehen. Die Montagehöhe des Waschbeckens ist in Revit auf 1,20 m voreingestellt. VDI 6000 Blatt 1 empfiehlt jedoch nur eine Höhe von 90 cm, weshalb diese aus Gründen der Benutzerfreundlichkeit umgesetzt wird.

Im Außenbereich bieten Sitzgruppen mit Sonnenschirmen den Besuchern Platz zum Ausruhen. Alternativ können auch Bäume als Schattenspender gepflanzt werden. Nichtsdestotrotz sollen auch Freiflächen zur Verfügung stehen, damit die Menschen auch ihre Teppiche zum Verweilen ausbreiten können. Auf dem Dach ist außerdem die Installation einer Photovoltaikanlage geplant. Die technischen Komponenten wie ein Speicher oder der Wechselrichter befinden sich gemeinsam mit dem Sicherungskasten im Technikraum.

Photovoltaikanlage

Die Grobplanung der PV-Anlage basiert auf den Ergebnissen des Online-Tools PV-GIS (Europäische Kommission 2022). Hiermit kann sowohl die monatliche als auch die jährliche Leistung ermittelt werden. Die Eingabeparameter werden dafür an die lokale Situation und an den exakten Standort des Dorfes Hamzehloos angepasst. Um eine Ausrichtung nach Süden im Tool umzusetzen, muss der Azimut auf 0° eingestellt werden. Durch Eingeben mehrerer Werte ergibt sich für Hamzehloo ein optimaler Neigungswinkel von 30°. Bei einer installierten Leistung von 1 kWp, was in etwa drei Modulen entspricht, ergibt sich bei der Annahme von 14 % Systemverlusten, einem Neigungswinkel von 30° und einer Ausrichtung gen Süden eine jährliche Leistung von 1.907 kWh (ebd.). Die monatlichen Erträge lassen sich aus Abbildung 61 ablesen. Der Verlauf der Kurve weist dabei eine starke Ähnlichkeit zu Deutschland auf. Jedoch sinkt im Untersuchungsgebiet die Leistung im Winter nicht so stark ab. Auch in den Sommermonaten liegt das Niveau in Hamzehloo mit rund 220 kWh im Monat deutlich über den in Deutschland zu erwartenden Werten.

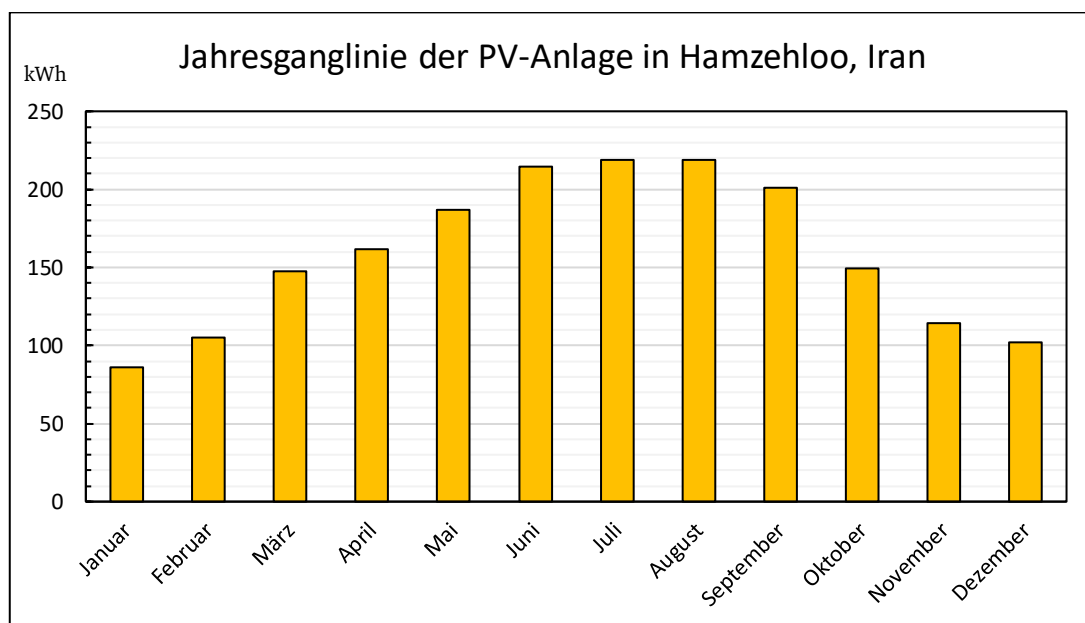


Abbildung 61: Jahresganglinie einer potenziellen PV-Anlage in Hamzehloo
(eigene Darstellung mit Daten aus Europäische Kommission 2022)

Der durchschnittliche Stromverbrauch eines 4-Personen-Haushaltes beträgt in Deutschland jährlich rund 4.000 kWh (statista 2023). In der ländlichen Region Irans sind die Werte deutlich niedriger anzunehmen. Aufgrund der hohen Anzahl technischer Geräte, die während Seminaren oder Grabungskampagnen in Betrieb sein könnten, wird von einem Bedarf von 2.500 kWh/a ausgegangen. Bei einer Anzahl von 20 Personen ergibt sich ein jährlicher Bedarf von 12.500 kWh. Dies entspricht in etwa 6,5 kWp bzw. einer Anzahl von 20 Modulen. Dementsprechend werden vier Konstruktionen mit je fünf Modulen installiert. Überschüssiger Strom soll gespeichert und an die Anlagegebäude sowie die Häuser der Dorfbewohner verteilt werden.

Die Modellierung der PV-Module erfolgt in Fusion 360. Dabei muss beachtet werden, dass immer eine Unterkonstruktion notwendig ist, weil beim Besucherzentrum ein Flachdach vorliegt. Dies ermöglicht

allerdings auch eine exakte Berücksichtigung des Neigungswinkels. Die Unterkonstruktion besteht aus einer Kombination simpler geometrischer Formen, wobei fünf dreiecksförmige Halterungen mit Querstreben verbunden sind. Auf dieser Konstruktion liegen die flachen PV-Module in einem Winkel von 30°. Die Ausrichtung nach Süden findet in Revit statt. Die Module müssen um 22,5° gedreht werden, da das Gebäude laut Plan in Westsüdwest ausgerichtet ist. Sobald das Gebäude tatsächlich in Realität umgesetzt wird, muss vor Ort genau bestimmt werden, in welche Richtung die Module gedreht werden, um das Optimum zu erreichen. Darüber hinaus ist beim Anordnen der Module darauf zu achten, dass keine gegenseitigen Verschattungen der Module resultieren. Denn dies hat eine Minderung der Energieerträge zur Folge. Zu Wartungs- und Reinigungszwecken erreichen die Bewohner und Techniker die Konstruktionen über die Dachterrasse des Besucherzentrums. Insbesondere in den Perioden ohne häufige Niederschläge sollen die Bewohner Schmutz- und Staubschichten mit einem feuchten Tuch abwischen, um so die Leistung der Anlage auf konstant hohem Niveau zu halten.

5.3.3. Technische Gebäudeausrüstung

Die Technische Gebäudeausrüstung (TGA) umfasst alle fest installierten technischen Anlagen. Zu den relevanten Bereichen für die in Hamzehloo gefertigten Bauten zählen das Raumklima mit Heizungs- und Lüftungstechnik, die Tages- sowie Kunstlichtbeleuchtung, sanitäre Einrichtungen sowie zu Teilen technische Kommunikationssysteme.

Die Implementierung der einzelnen Bauteile ins Modell richtet sich wie zuvor beim Inventar ebenso nach den Räumen. Die Elemente müssen größtenteils neu in das Projekt geladen werden, da sich die ursprüngliche Vorlage auf die Fachrichtungen Architektur und Ingenieurbau konzentriert. Danach finden sich die Bauteile im Reiter Gebäudetechnik.

In den Bereich Elektro fallen **Lichtschalter** und **Steckdosen**. Je nach Räumlichkeit und Anzahl der Deckenlampen sind Doppeltaster oder einfache Schalter verbaut. Die Installationshöhe beträgt nach DIN 18015-1 exakt 1,05 m. Der Abstand zur Tür soll 10 cm betragen. Während in Deutschland Steckdosen und Lichtschalter in der Regel übereinander angeordnet sind, befinden sich die beiden ElektrokompONENTEN in Iran nebeneinander. Dementsprechend liegt die Installationshöhe bei Steckdosen entweder ebenfalls auf 1,05 m oder auf der genormten Höhe von 0,30 m, die ebenfalls in der Software bereits voreingestellt ist. Lediglich in Einzelfällen weicht die Installationshöhe aufgrund individueller Bedürfnisse von der Norm ab. Dies geschieht beispielsweise in der Küche, wo sich die Steckdosen an der Höhe der Arbeitsplatte orientieren.

Die **Beleuchtung** der Räume basiert auf runden Deckenleuchten. Für die Modellierung wählt der Nutzer die jeweilige Ebene (UK DG 1 bzw. UK DG 2) aus, um die Lampen zu positionieren. Eine Änderung ist jederzeit manuell möglich. Außerdem befinden sich Tischlampen im Arbeits- sowie Gästebereich. Die Kabel werden Unterputz verlegt, weshalb sie in diesem Modell nicht visualisiert sind. Aber in den Gebäuden der Wasserversorgungsinfrastruktur erfolgt die Modellierung Aufputz. Die Vorgehensweise wird deshalb im Kapitel 6.1.3 ausführlich erläutert.

Für die **Wasserleitungen** kommen starre Rohre, Rohrformteile wie 90°-Bögen, T-Stücke oder Verbindungen sowie Rohrzubehör wie Ventile, Armaturen oder Schieber zum Einsatz. Bei den Rohren muss zuerst der Typ bearbeitet werden. Denn das Material muss von Gusseisen auf Kunststoff geändert werden, da im Vorhaben lediglich PE-Rohre verlegt werden. Außerdem verfügen lediglich Kunststoffrohre über die benötigten Durchmesser. Die jeweiligen Rohrdurchmesser sind gemäß DIN EN ISO 3126 mit Nennweite, Innen- und Außendurchmesser tabellarisch hinterlegt. Allerdings verfügt das Programm nicht über DN 75, weshalb bei der Modellierung stattdessen DN 80 verwendet wird, da durch die minimale Abweichung keine optischen Unterschiede entstehen. Im Eigenschaftenmenü lässt sich zudem auch der Systemtyp, in diesem Fall Kaltwasser, die jeweilige Ebene (UK KG)

sowie der Durchmesser je nach Wunsch festlegen. Dieser variiert bei dem Projekt zwischen DN 50 und DN 75, wobei letzterer als DN 80 modelliert wird.

Im Modell des Besucherzentrums soll die Wasserver- und -entsorgung lediglich im Ansatz gezeigt werden. Eine detaillierte Beschreibung der Vorgehensweise und Implementierung folgt wie bei den Stromleitungen erst bei den Bauten der Wasserversorgungsinfrastruktur. Beim Besucherzentrum muss der Anschluss der vier Nasszellen, der Küche sowie des Wasserbeckens mit einer Frisch- und Abwasserleitung sichergestellt sein. Gegebenenfalls ist zukünftig ein weiteres Rohrleitungsnetz notwendig, wenn die sog. blaue Infrastruktur auf den Dachflächen wie ursprünglich angedacht umgesetzt wird. Das hierbei aufgefangene Regenwasser wird gesammelt, gebündelt und anschließend als Brauchwasser mit oder ohne Aufbereitung einer weiteren Nutzung zugeführt. Die Anschlüsse aller Rohrleitungen müssen von einer Fachkraft vor Ort verlegt werden, wobei insbesondere im Freien die Frosttiefe zu berücksichtigen ist.

Abwasserbehandlung

Die Planung sieht eine Implementierung einer Kleinkläranlage vor. Diese befindet sich derzeit nur in der Vorplanung, weshalb auf eine konkrete Modellierung verzichtet wird. Aufgrund der geringen Einwohnerzahl bietet das Verfahren des Sequencing batch reactor (SBR) Vorteile. Diese Methode stellt eine Art des Belebtschlammverfahrens dar. Dabei unterscheidet sich das SBR-Verfahren vom konventionellen Belebtschlammverfahren in der Hinsicht, dass die Abwasserbehandlung und -reinigung nicht in mehreren, räumlich voneinander getrennten Becken stattfindet, sondern die Reaktionen während eines Zyklus in einem Behälter ablaufen (Räbiger et al. 2023).

Der Tank besteht aus zwei Kammern. Die erste Kammer dient primär als temporärer Speicher sowie der Vorreinigung des anfallenden Abwassers. Im Anschluss wird das Abwasser in den eigentlichen SBR gepumpt. Dort ereignet sich die biologische Reinigung. Die Mikroorganismen des Belebtschlamm entfernen dabei die schädlichen Inhaltsstoffe. Mit Hilfe einer integrierten Belüftung werden die bevorzugten Milieubedingungen erreicht. Gleichzeitig verhindert der intermittierende Betrieb der Belüftung ein Absetzen des Belebtschlamm. Nach ausreichender Behandlung folgt die Absetzphase. Hierbei trennt sich das Abwasser in zwei Zonen, wobei der Schlamm sedimentiert. Anschließend wird zunächst das gereinigte Wasser abgezogen. Dabei wird sichergestellt, dass kein Schlamm aufgewirbelt wird. Im zweiten Schritt wird auch der überschüssige Schlamm automatisch abgepumpt. Hierbei verbleibt jedoch immer eine vorgegebene Menge an Belebtschlamm im Behälter, um die nächste Charge reinigen zu können. (Garten-Zisternen 2021; Räbiger et al. 2023)

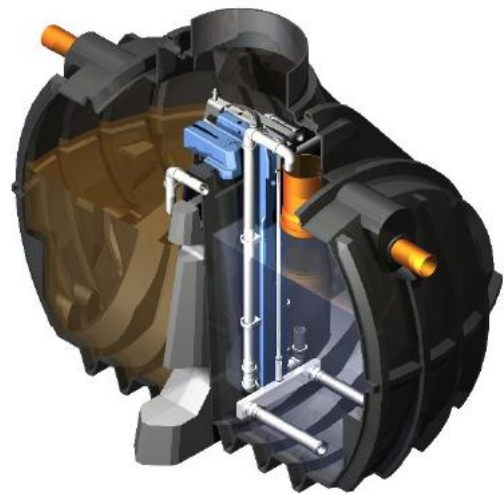


Abbildung 62: SBR-Behälter
(Garten-Zisternen 2021)

5.3.4. Topografie

Für den Standort ist keine Besonderheit hinsichtlich der Topografie geplant, da das Besucherzentrum auf einem Plateau oberhalb des Dorfes realisiert wird. Für eine bessere Visualisierung im Revit-Modell erfolgt eine Darstellung des Geländes. Die detaillierte Umgebung ist dagegen im Gesamtmodell in InfraWorks bereits ersichtlich (siehe Abbildung 95 im Anhang).

In Revit erfolgt die Modellierung des Plateaus im Abschnitt *Körpermodell & Grundstück* mittels der Funktion *Gelände*. Hierzu muss der Grundriss des EG geöffnet werden, um dort Punkte zu platzieren. Die Punkte können frei Hand um das Bauwerk herum positioniert werden, wobei darauf zu achten

ist, dass die Höhe immer auf Null festgelegt wird. Wenn ausreichend Punkte gesetzt wurden, bestätigt der Anwender die Geländeoberfläche mit dem grünen Haken im Menü, um die Oberfläche fertig zu stellen. In der Topografie ist bei der Software automatisch eine Grünfläche als Material hinterlegt. Im bergigen Umfeld des Dorfes ist allerdings eher eine hellbraune, sandige Erdschicht zu erwarten. Demzufolge wird das Material im Eigenschaftenmenü geändert.

5.4. Ausgrabungsstätte

Die Ausgrabungsstätte befindet sich etwas vom Dorf abgelegen. Eine Straße am Fuße des Douzlakh verbindet die beiden Standorte miteinander. Für die Grabungskampagnen stehen Container zur Verfügung. Dort lagert Material, wobei die neu aufgestellten Container auf dem Plateau ebenfalls Raum zum Verweilen und Arbeiten bieten. Ein großes Trapezblechdach schützt die Ausgrabungsstätte vor Witterungseinflüssen. Dieses wird durch ein Gerüst gestützt. Infolge der Grabungskampagnen und der vorherigen Arbeiten im Bergwerk liegt ein sehr starkes Gefälle vor. Dieses ist jedoch nicht im digitalen Geländemodell von InfraWorks sichtbar, da die Daten von OpenStreetMap in diesem Bereich sehr ungenau ausfallen. Aufgrund dessen entfällt die Modellierung der provisorischen Treppen.



Abbildung 63: Ausgrabungsstätte von oben
(eigene Aufnahme)

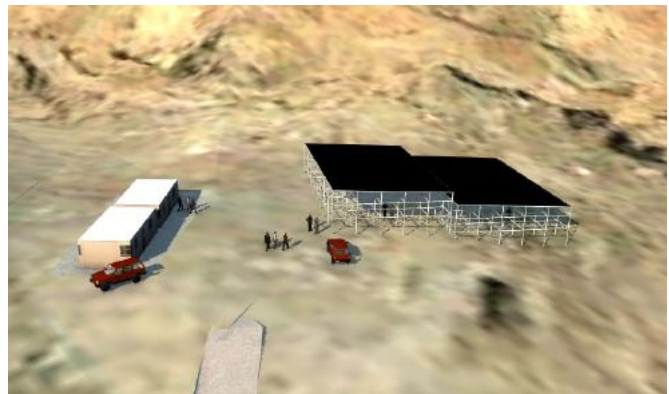


Abbildung 64: Modellierung der Ausgrabungsstätte
(eigene Darstellung)

Die beiden Abbildungen zeigen den Vergleich zwischen Realität und digitalem Zwilling. Die Visualisierung erfolgt mit den beiden Programmen Fusion 360 und InfraWorks. Die Überdachung erstreckt sich über zwei Ebenen und besitzt jeweils eine Länge von ca. 20 m und eine Breite von ca. 12,5 m. Das Gefälle beträgt 3°, wodurch das Regenwasser selbstständig abläuft. Die Höhe des Daches beläuft sich auf fünf Meter, wobei alle 2,5 m Stützen mit Querstreben für eine ausreichende Stabilität sorgen. Das Dach setzt sich aus einzelnen Trapezblechen zusammen. Jede Komponente besitzt eine Grundfläche von 1 m mal 2,5 m.

Mit Hilfe des Programms InfraWorks werden die Container dargestellt. Im Gegensatz zu den Gebäuden im Dorf erfolgt die Visualisierung mit der Fassade des Typs *Brick/Philemon*. Die Farbe der Wände und des Daches soll weiß sein. Die Höhe beträgt 2,5 m. Neben den Containern werden auch im Programm Personen und Fahrzeuge hinzugefügt, um das Modell realistischer zu gestalten. Die Elemente befinden sich in der Rubrik *Umgebung* unter *Stadtmöbeln*. Die Unterkategorien lassen sich in verschiedene Bereiche gliedern, wodurch die gewünschten Komponenten schneller gefunden werden. Die Personen und Fahrzeuge können mittels *Drag & Drop* an der gewünschten Position eingefügt werden.

5.5. Infrastruktur

Die Infrastruktur gliedert sich in Flüsse und Verkehrswege sowie in die Strom- und Gastrasse. Des Weiteren werden im Rahmen des Projektes Wasserleitungen verlegt. Die Erläuterungen dazu folgen jedoch in Kapitel 6.4, welches sich speziell auf das Transport- und Verteilnetz konzentriert. Die Modellierung der verschiedenen Infrastrukturen geschieht mit Hilfe von InfraWorks. Abbildung 65 zeigt einen Ausschnitt des digitalen Modells.



Abbildung 65: Modellierung der Infrastruktur (eigene Darstellung)

Verkehrswege

Das DGM von OpenStreetMap beinhaltet bereits die beiden großen Verbindungsstraßen nördlich und westlich des Dorfes. Jedoch sind diese als mehrspurige Autobahnen hinterlegt, weshalb in den Fällen der Typ geändert werden muss. Die beiden Straßen werden in Straßen mit einer Fahrspur je Richtung inklusive Bankett umgewandelt. Die abzweigende Stichstraße nach Hamzehloo wird als unbefestigte Straße in der Software dargestellt. Für die Modellierung wird im Bereich *Verkehrswesen* die *Planstraße* ausgewählt. Hier kann der Anwender den passenden Straßentyp definieren. Im Anschluss erfolgt die Implementierung der Straße anhand eines Pfades im Modell. Dieser Pfad ist durch den Nutzer frei bestimmbar und wird mittels Mausklicks festgelegt. InfraWorks zeigt dabei den bisherigen Verlauf des Verkehrsweges rot gestrichelt an, wodurch die Orientierung jederzeit gegeben ist und sich der User besser zurechtfindet. Jeder gesetzte Punkt kann manuell verschoben werden und bei Bedarf individuell bezüglich der Höhe angepasst werden. Der Abzweig Richtung Ausgrabungsstätte erfolgt analog. Der jeweilige Straßenverlauf ergibt sich aus den während der Kampagnen gewonnenen Ortskenntnissen sowie den Luftaufnahmen der Region. Um das Besucherzentrum und das Reservoir anzubinden, bedarf es neue Straßen. Die Erschließung findet im Zuge des Baus statt. In beiden Fällen ist eine unbefestigte Straße vorgesehen. In InfraWorks werden diese Wege zunächst als Straße des Typs *Sand Road* dargestellt. Der konkrete Ausbau hängt jedoch auch stark mit der Frequentierung zusammen.

Flüsse

Wie bei den Straßen zuvor sind auch bereits die beiden Flüsse im DGM hinterlegt. Der Verlauf dieser muss jedoch leicht angepasst werden, damit diese im tatsächlichen Flussbett verlaufen. Zusätzlich muss die Modellierung des Baches, der durch das Dorf fließt, durchgeführt werden. Der Verlauf richtet sich auch hier nach Aufnahmen, die während der Kampagnen im Jahre 2022 entstanden. Um im Programm den Bachlauf zu erzeugen, muss in der Drop-Down-Liste der Kategorie *Umgebung* das Werkzeug *Fluss* ausgewählt werden. Die Vorgehensweise der linearen Darstellung stimmt mit der Modellierung der Straßen überein. Die Breite soll sich auf einen halben Meter belaufen. Weiterhin legten die Dorfbewohner einen Teich an, in dem Fische für den Verkauf gezüchtet werden. Dieser lässt sich mit Hilfe der Funktion *Wasserfläche* modellieren. Die Breite der Böschung beträgt 1 m. Sowohl die Verkehrswege als auch die Oberflächengewässer sind in Abbildung 93 im Anhang gut zu erkennen.

Stromtrasse

Die Übertragung und Verteilung der elektrischen Energie basiert in der ländlichen Mahneshan-Region stets auf Überlandleitungen. Diese verlaufen parallel zu den Verkehrswegen, um eine regelmäßige

Wartung zu gewährleisten und Reparaturen unkompliziert durchführen zu können. An den beiden Verbindungsstraßen werden im digitalen Modell Freilandleitungen hinzugefügt, deren Strommasten einen Abstand von 150 m zueinander haben. Aus optischen Gründen erfolgt eine Drehung der Masten um 90°. Der Verlauf der Stromleitungen wird entlang eines Pfades vorgegeben, wodurch die Software automatisch die einzelnen Strommasten anhand des definierten Abstandes generiert. Ab dem Abzweig in Richtung Hamzehloo kommen Masten des Typs *Multiline* zum Einsatz. Der Abstand zwischen den Masten der Überlandleitung beträgt hierbei nur 100 m. Im Dorf selbst werden weitere Strommasten manuell hinzugefügt. Deren Positionierung orientiert sich an den Aufnahmen von vor Ort. Im Dorf stehen darüber hinaus nur Masten des Typs *Simple*. Diese zeichnen sich durch eine geringere Höhe und nur einer Stromleitung aus. An verschiedenen Standorten muss der konventionelle Strommast mit einem Transformator ergänzt werden. In Hamzehloo betrifft dies einen Masten in der Dorfmitte, der direkt mit einem Verteilerkasten verbunden ist sowie den Masten neben dem Gebäude der Aufbereitungsanlage. Außerdem muss ein Mast der Freilandleitung nahe dem Brunnenhaus um einen Transformator ergänzt werden, um dort den benötigten Strom bereitzustellen. Die unterschiedlichen Strommasten sind u. a. in Abbildung 54 zu sehen.

Gastrasse

Der Trassenverlauf der Gasleitungen beruht auf den offiziellen Plänen und dem Leitungskataster. Die Karte (siehe Abbildung 96 im Anhang) besitzt einen groben Maßstab, wodurch der exakte Verlauf im Gelände nicht ersichtlich ist, da hierfür keine GPS-Daten zur Verfügung stehen. Weil allerdings der Bau während der Kampagne im Oktober 2022 bereits vollzogen war, gibt es im Dorf Eckpunkte für eine genauere Modellierung. Die Gasleitung mit DN 300 wird in einer Tiefe von 1,6 m verlegt. Gas-hochdruckleitungen bestehen meist aus Stahl. Die Rohrleitung wird im Modell gemäß DIN 2403 mit einer gelben Farbe gekennzeichnet. In den Planungen sollte auch ein Schutzstreifen abhängig des Leitungsdurchmessers berücksichtigt werden. Nach DVGW G 462 (A) liegt bei Leitungen mit DN 300 die Breite bei sechs Metern. Dies bedeutet, dass beidseitig im Abstand von 3 m keine baulichen Anlagen errichtet werden dürfen.

Für die Modellierung in InfraWorks müssen die Rohrleitungen im Bereich *Entwässerung* verwendet werden. Als Zeichnungsstil wird *Yellow Pipe* ausgewählt. Der Verlauf der Trasse erfolgt erneut über eine händische Platzierung anhand des gewünschten Pfades. Es ist dabei darauf zu achten, die Trasse ohne Unterbrechungen aus der Vogelperspektive zu erstellen, um im Nachhinein keine Probleme beim Zusammenfügen einzelner Abschnitte zu erhalten. Die Leitung lässt sich mit Hilfe eines Doppelklicks abschließen. Anschließend können die Eigenschaften der Rohrleitung im Menü ergänzt werden. Als Name des Netzes wird Gasleitung eingetragen, um die Trasse im späteren Verlauf von den Wasserleitungen abgrenzen zu können. Aufgrund des Durchmessers ergibt sich für die Programm hinterlegten Größen X und Y jeweils 0,3 m. Neben dem Material erfolgt auch die Angabe des Höhenversatzes. Da die Gasleitung unterirdisch verläuft, beträgt dieser -1,6 m. Darüber hinaus ermöglicht InfraWorks auch die Angabe des Erstellungsdatums, wodurch sich anhand einer weiterführenden Nutzung des Modells die Lebensdauer der Leitungen abschätzen lässt. Außerdem bietet dies eine Gelegenheit, potenzielle Wartungsintervalle und Reparaturen zu planen.

6. Modellierung der künftigen Wasserversorgungsinfrastruktur

Die Wasserversorgungsinfrastruktur des Dorfes Hamzehloo basiert auf einem Brunnenhaus, welches zur Wasserförderung genutzt wird, einem Reservoir zur Wasserspeicherung, einem Gebäude, in dem die Wasseraufbereitung stattfindet, sowie dem Transport- und Verteilnetz. Die Modellierung der Detailbauten erfolgt in Revit, wobei eine Vielzahl der Bauteile in Fusion 360 dargestellt werden, um die exakten Bedingungen vor Ort in der Planung und im digitalen Modell zu berücksichtigen. Die Beschreibung orientiert sich wie zuvor jeweils an der Vorgehensweise während der Modellierung und entspricht nicht der Reihenfolge, in der die Bauwerke errichtet werden.

6.1. Wasserförderung

Ein wichtiger Bestandteil der Wasserversorgungsinfrastruktur stellt das Brunnenhaus dar. Für das bessere Verständnis der folgenden Erläuterungen, zeigt Abbildung 66 den geschnittenen Aufbau des Gebäudes. Im Anhang befindet sich zudem Abbildung 97, welche das gesamte Bauwerk mitsamt dem Brunnen veranschaulicht.



Abbildung 66: Schnitt des Brunnenhauses (eigene Darstellung)

6.1.1. Gebäude

Die Vorgehensweise ähnelt der des Besucherzentrums in Kapitel 5.3 stark. Aufgrund dessen konzentrieren sich die Ausführungen hauptsächlich auf Besonderheiten des Bauwerks. Das Brunnenhaus befindet sich inmitten eines potenziellen Überflutungsgebiets. Deshalb müssen besondere Schutzmaßnahmen getroffen werden, um eine nachhaltige Nutzung sowie eine klimaresiliente Infrastruktur sicherzustellen.

Wände

Im Rahmen des Hochwasserschutzes muss eine Abdichtungsschicht bei allen Wänden integriert werden. Diese erfolgt nach den Vorgaben bei erdberührten Bauteilen gemäß DIN 18533-1 und ist mit der sog. Schwarzen Wanne vergleichbar, die hierzulande beispielsweise im Kellerbau Anwendung findet. Als tragende Schicht fungiert dabei Naturstein (25 cm). Daran schließt die drei Zentimeter dicke Bitumschicht an, die wiederum mit einer 12 cm mächtigen Schicht aus Mauerwerk geschützt ist (Dierks und Wormuth 2012). Innen wird ein Gipsputz angebracht. Außen schließt die Wand mit einem Lehmputz ab.

Fundament

Das Streifenfundament besitzt eine Tiefe von 90 cm. Begründet wird dies durch die leicht bindigen Bodenschichten, weshalb die Gefahr durch Frostschäden am Fundament steigt. Außerdem kann es zur Erosion während Hochwasserereignissen kommen. Die Bodenplatte wird mit Hilfe einer nicht-tragenden Geschossdecke modelliert, weil außer dem Eigengewicht keine hohen Lasten anfallen. Dies bedeutet, dass die Stahlbetonschicht nur 15 cm beträgt. Darunter liegt die Bitumendeckschicht, welche bündig mit der Wandabdichtung verlegt werden muss, um die gewünschte Wirkung zu erzielen. Unter der Abdichtung schließt eine zehn Zentimeter dicke Sauberkeitsschicht an, um die Abdichtung zu schützen (ebd.). Als Abschluss und Angrenzung zur Erdschicht dient eine 15 cm dicke Kiesschüttung.

Öffnungen

Als Tür soll eine Fluchttüre aus Stahl in Standardmaßen eingebaut werden. Diese dient nicht nur dem Brandschutz, sondern auch dem Hochwasserschutz. Denn die Tür stellt das schwächste Teil des Bauwerks dar. Diese wird an der Westseite des Gebäudes integriert, weil dies die abgelegene Seite des potenziellen Wasserandrangs infolge eines Hochwassers ist. Darüber hinaus schreibt DVGW W 122 (A) im Rahmen des Hochwasserschutzes eine Türschwelle von 15 cm vor.

Das Brunnenhaus verfügt zudem über einen Schacht, über den die Wasserleitungen ins Freie geführt werden. Gleichzeitig kann dieser ebenfalls als Pumpensumpf genutzt werden, um Wasser abzusaugen. Der Schacht besitzt eine quadratische Öffnung mit einer Kantenlänge von 1,0 m und reicht 1,1 m in den Baugrund. Dies gewährleistet eine unproblematische Rohrleitungsführung unterhalb des Streifenfundaments. Die Schachtwände bestehen aus zehn Zentimeter dickem Leichtbeton. Alternativ können auch Mauerziegel verwendet werden.

In der Achse des Brunnens muss außerdem eine Öffnung im Dach eingeplant werden, um den Austausch der Pumpe zu ermöglichen. Diese soll ebenfalls quadratisch ausfallen. Weil die Brunnenringe einen Durchmesser von einem Meter besitzen, bietet es sich an, auch diese Öffnung mit einer Kantenlänge von einem Meter einzuplanen. Dies bietet ausreichend Platz für die Arbeiten, die vom Dach aus verrichtet werden.

Luken

Sowohl der Schacht innerhalb des Gebäudes als auch die Dachöffnung muss aus Sicherheitsgründen mit einer Luke verschlossen werden. Beide werden mit Fusion 360 erstellt, da in Revit kein geeignetes Bauteil existiert. Neben der quadratischen Oberfläche besteht die Luke aus einem Metallrahmen sowie zwei Gelenken, welche die beiden Komponenten verbindet. Darüber hinaus verfügt die Luke über zwei Griffe, die das Öffnen und Schließen erleichtern. Die Dachluke lässt sich bis zu 180° öffnen, wobei zur besseren Visualisierung ein geringer Winkel im Modell dargestellt ist. Des Weiteren ist das Material in einem charakteristischen Blauton lackiert. Dieser kommt bei allen metallischen Bauteilen, die von außen sichtbar sind, als Wiedererkennungsmerkmal der Wasserversorgungsinfrastruktur zum Einsatz. Abbildung 67 vergleicht die reale mit der modellierten Version der Dachluke.

Die Bodenluke ist im Gegensatz dazu nicht lackiert. Allerdings verfügt diese über eine Aussparung für das Leitungsrohr (DN 75). Abhängig von der finalen Anordnung der Armaturen muss diese

mindestens 10 cm mal 10 cm betragen. Die Aussparung lässt sich in Fusion 360 über einen zweiten Körper in den gegebenen Maßen erreichen. Mit Hilfe der Funktion *Kombinieren* kann die Schnittfläche der beiden Körper ausgeschnitten werden, indem die Luke als *Zielkörper* und der eigens erstellte Körper als sog. *Werkzeugkörper* ausgewählt wird. In der Modellierung wird die Luke in einem 100°-Winkel geöffnet dargestellt. Aus praktischen Gründen und aus Gründen der Arbeitssicherheit ist es sinnvoll, einen Haken in der Wand zu befestigen, um die Luke in geöffneter Position zu fixieren und somit gegen Kippgefahr zu sichern.

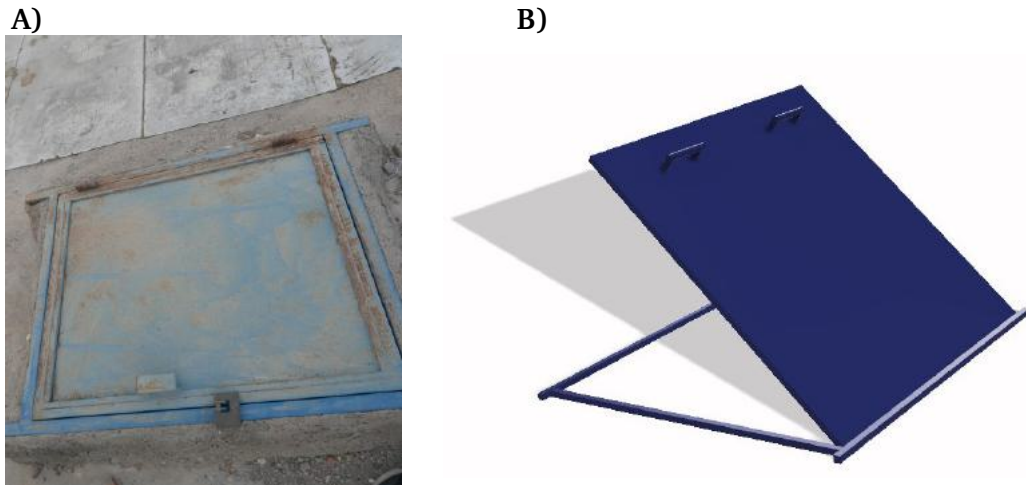


Abbildung 67: Vergleich der Dachluken in echt (A) und im Modell (B) (eigene Aufnahmen)

Tragwerk

Die Stahlträger werden in einem Abstand von 43 cm verlegt, wodurch sie mit den Betonträgern der Sandwichelemente kombiniert werden können. Dazu soll die Breite der IPE-Träger 15 cm betragen und die Elemente mit einer Querschnittsdrehung von 90° verbaut werden. Aufgrund der Dachöffnung muss das System an die geänderten Bedingungen angepasst werden, um trotzdem alle Lasten in den Baugrund ableiten zu können und die Statik des Gebäudes zu gewährleisten. Deshalb wird der zweite Stahlträger gekürzt und mit zwei Querbalken verschweißt. Dadurch entsteht die erforderliche Öffnung, wie sie in Abbildung 68 zu sehen ist.

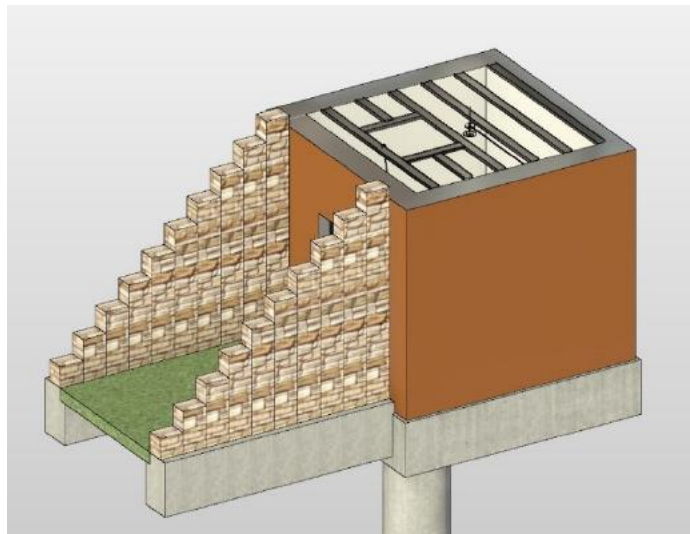


Abbildung 68: Tragwerk des Brunnenhauses (eigene Darstellung)

6.1.2. Wasserspezifische Anlagen

Dieses Unterkapitel umfasst den Brunnen sowohl in der alten als auch neuen Bauweise, den Brunnenkopf nach DIN 4926 sowie die Pumpe. Die eingebrachten **Brunnenringe** verbleiben weiterhin im Boden. Diese werden als nichttragende Wand aus Leichtbeton in Revit modelliert. Dementsprechend kommt unbewehrter Ortbeton zum Einsatz, wobei die Ringe einen Außendurchmesser von 1,0 m und eine Dicke von 8 cm haben. Damit der Brunnenabschluss innerhalb des Gebäudes liegt, bedarf es einen Versatz nach oben um 10 cm, der ins Eigenschaftenmenü eingetragen wird. Der Versatz nach unten beträgt 12,4 m und entspricht der Tiefe der Brunnenringe.

Brunnenkopf

Die Modellierung des Brunnenkopfes erfolgt mit dem Programm Fusion 360. Aufgrund der erhaltenen Brunnenringe bedarf es einer **Stahlplatte**, die für den Bereich zwischen Brunnenringen und Filterrohr als Abdeckung fungiert. Diese ist von den Maßen her so angepasst, dass sie bündig an der Außenkante des Brunnens schließt und in der Vertikalen handbreit übersteht. Der Brunnenkopf muss wasserdicht und demontierbar sein, damit bei einem Hochwasserereignis kein kontaminiertes Oberflächenwasser in den Brunnen eindringt. Aufgrund dessen wird die Stahlabdeckung mit einem Dichtkleber an die Brunnenringe fixiert. Dabei ist darauf zu achten, dass der Kleber für die Werkstoffe Beton und Stahl geeignet ist und gegen Wasser versiegelt.

Die Last der Pumpe und der Steigleitung soll jedoch nicht von den Brunnenringen aufgenommen werden, da diese bereits Risse aufweisen, sondern von dem **Stahlrohr**. Die Rohroberkante ragt weitere zehn Zentimeter über die Abdeckung hinaus und weist den Durchmesser DN 300 auf. Um die Dichtheit zu garantieren, wird das Rohr mit der Stahlplatte verschweißt. Das Filterrohr ist als Hohlzylinder modelliert und besteht zu großen Teilen aus einem Vollwandrohr. Die Schlitze, die das Eindringen des Grundwassers ermöglichen, werden mittels eines Hilfskörpers generiert. Dieser wird mit der Funktion *runde Anordnung* vollständig um das Rohr verteilt und anschließend vervielfältigt. Dabei ist zu beachten, dass zwischen den Schlitzen die erforderlichen Abstände eingehalten werden. Deshalb erfolgt ein Versatz jeder zweiten Schlitzreihe um 36° , sodass die fünf Schlitze je Ebene stets den maximalen Abstand zueinander aufweisen. Die Hilfskörper werden auf einer Höhe von 5 m eingefügt und im Anschluss mit der Funktion *Ausschneiden* entfernt. Dies hinterlässt die gewünschten Lücken im Rohr.

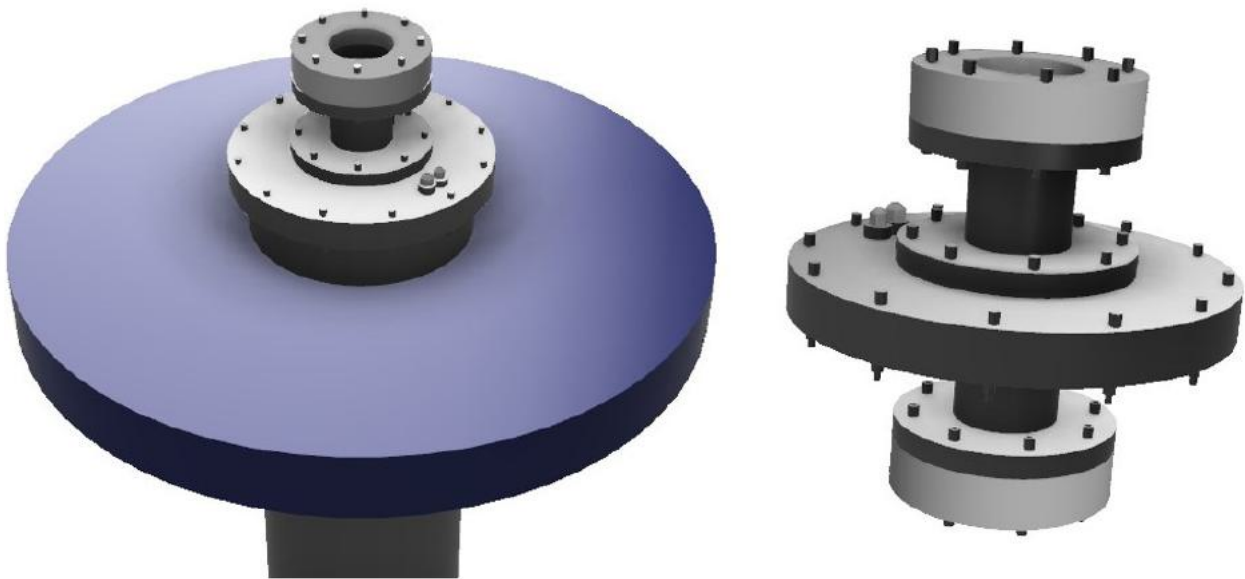


Abbildung 69: Detailaufnahmen des modellierten Brunnenkopfes (eigene Darstellung)

Der Steigrohrdurchgang hängt von dem Durchmesser des Filterrohres ab und beträgt nach DIN 4926 für den vorliegenden Fall 310 mm. Darüber hinaus bedarf es eine weitere Stahlplatte, die das Filterrohr abdeckt. Die kreisförmige Platte ragt dabei 5 cm über den Rand hinaus, um ausreichend Platz für die Anbringung der **Verschraubung** zu haben. Die Sechskantschrauben nach DIN EN ISO 4016 sowie die Muttern nach DIN EN ISO 4034 werden mittels *Polygon* mit sechs Ecken dargestellt. Unterlegscheiben werden allerdings nicht modelliert. Die Anzahl der Schrauben orientiert sich an DIN EN 1092-1. Bei einer kreisförmigen Anordnung benötigt es für DN 300 zwölf Schrauben, für DN 75 acht.

Mit dem Steigrohr sind mehrere **Flansche** verbunden. Der Tragflansch verbindet die Stahlplatte des Filterrohres mit dem Steigrohrdurchgang. Der Losflansch bildet den Übergang am oberen Ende des Steigrohres, während der sog. Vorschweißflansch das untere Ende markiert. Die Details sind Bild 2 und 3 der DIN 4926 zu entnehmen. Abbildung 69 zeigt die modellierte Version, wobei der rechte Teil der Abbildung die Details des Steigrohres inklusive der verschiedenen Flansche und Verschraubungen illustriert. Die beiden äußeren Flansche bestehen aus zwei Ringen. Der jeweils äußere Ring schließt an das PE-Rohr an, weshalb der Flansch eine Verbindung zwischen den beiden Materialien darstellt. In Fusion lassen sich *Gelenke* einfügen, um die beweglichen Teile besser zu modellieren. Allerdings gehen diese Funktionen beim Import in Revit verloren, weshalb in diesem Fall auf diese Visualisierung verzichtet wird. Um einen wasserdichten Brunnenkopf sicherzustellen, beinhaltet jede Verschraubung eine Dichtung. Diese muss gemäß DIN 4926 mindestens 4 mm betragen. Die Bemessung der Flansche erfolgt nach DIN EN 1092-1, wobei erneut auf eine ausreichende Kante für eine optimale Verschraubung geachtet werden muss. Die Hohlräume der Schrauben können in Fusion 360 mit Hilfe der *Bohrung* visualisiert werden.

Die abschließende Stahlplatte des Filterrohres umfasst zudem auch zwei Öffnungen. Die erste ist für die **Kabeldurchführung** der Pumpe, die zweite für das Stahlseil, welches die Pumpe absichert. Der typische Leitungsdurchmesser misst 14 mm und besitzt ein PG16-Gewinde (DIN 40430). Beide Öffnungen sollen als Schlitzlochung ausgeführt werden, wobei eine wasserundurchlässige Dichtmasse entstehende Hohlräume versiegelt. Um die Durchführung der beiden Komponenten einfacher zu gestalten und die Dichtung zu gewährleisten, sollen die Bauteile einen Zentimeter überstehen. Die Kappe der Kabeldurchführung besteht meist aus einer Sechskantverschraubung aus Kunststoff. Diese wird mit Hilfe der Funktion *Polygon-außen* modelliert. Mit dem Werkzeug *Abrunden* wird die Form im oberen Drittel der Elemente angepasst. Das **Stahlseil** fällt mit einem Durchmesser von 17 mm etwas größer aus. Für eine vereinfachte Bauweise ist es möglich, statt zwei verschiedene Kappen einzuplanen, zwei baugleiche Teile zu verwenden. In diesem Fall muss beim Stromkabel allerdings auf eine ausreichende Dichtung geachtet werden.

Bei der **Steigleitung** muss abgewogen werden, ob für das Teilstück ein Rohr aus Polyethylen oder Stahl zum Einsatz kommt. Das Stahlrohr ist stabiler und über Flansch leicht demontierbar. Jedoch wiegt Stahl deutlich mehr. Außerdem korrodiert das Material im salzhaltigen Grundwasser. Für PE-Rohre sind in diesem Abschnitt keine Fittings möglich. Allerdings reichen Flansche aus, die über einen Druck von bis zu 16 bar standhalten, da die PE-Rohre die gleichen Voraussetzungen erfüllen. Darüber hinaus ist Polyethylen mobiler und leichter, was die Wartungsarbeiten erleichtert. Aus den genannten Gründen fällt die Entscheidung auf ein durchgängiges PE-Rohr. Die Modellierung erfolgt auch hier als Hohlzylinder.

Als **Pumpe** wird das Modell 4SKM200 in Betrieb genommen. Um die Pumpe zu modellieren, wird diese in verschiedenen Teilelementen in zylindrischer Form erstellt, da diesen im Anschluss unterschiedliches Material zugewiesen werden kann. Denn der Rotor besteht aus Messing, während das Gehäuse aus Edelstahl ist. Ähnlich wie bei den Schlitten des Filterrohres, werden auch hier Löcher in den Edelstahlsieb eingefügt. Einzelne, radial angeordnete Zylinder dienen dabei als *Werkzeugkörper* und durchschneiden das Bauteil. Das obere Ende der Pumpe wird zudem *abgerundet*. Um die Pumpe an einen Schlauch oder ein Rohr anschließen zu können, verfügt diese über einen achteckigen Stutzen. Dieser besitzt einen Durchmesser von 1 Zoll mit einem integrierten Innengewinde. Für eine Verbindung zwischen Pumpe und Steigleitung bedarf es ein Reduzierstück. Dabei sollte darauf geachtet werden, dass auch hier eine Gummidichtung auf der Innenseite anliegt und beide Bauteile fest miteinander verbunden werden. Das Reduzierstück ist in Fusion 360 ebenfalls aus Messing dargestellt.



digitalen Zwilling (eigene Aufnahme)

Das **Stromkabel** der Pumpe wird mit einer Kombination aus Zylindern in Fusion 360 dargestellt, um die Biegung zu erreichen. Das Kabel soll nicht das Gewicht der Pumpe tragen, sondern hängt locker im Filterrohr. Helukabel (2021) bietet ein salzwasserbeständiges Stromkabel an, welches über eine Zulassung für Trinkwasser nach DVGW W 270 verfügt. Vor Ort ist ein ähnliches Kabel aus lokaler Herstellung einzubauen.

Das **Stahlseil** wird an der Pumpe befestigt und durch die Öffnung an der Stahlplatte geführt. Das Seil dient jedoch nur als Sicherung, falls die Steigleitung das Gewicht der Pumpe nicht trägt oder die Verbindung zwischen Pumpe und Steigleitung einen Defekt aufweist. Das Stahlseil kann direkt am Brunnenkopf eingehakt werden. Im Modell ist jedoch eine Alternative verdeutlicht. Das Stahlseil wird dabei direkt neben der Dachluke an einem Stahlträger oder einer Deckenhalterung befestigt. Denn im Falle eines Defekts muss das Seil so befestigt sein, dass es die gesamte Last der Pumpe aufnimmt. Der modellierte Haken soll zudem ermöglichen, dass die Pumpe mit Hilfe eines auf dem Dach aufgestellten Dreibeins über die Montageluke aus dem Brunnen gezogen werden kann. Dies soll eine Reparatur auch bei einem Schadensfall ermöglichen.

6.1.3. Technische Gebäudeausrüstung

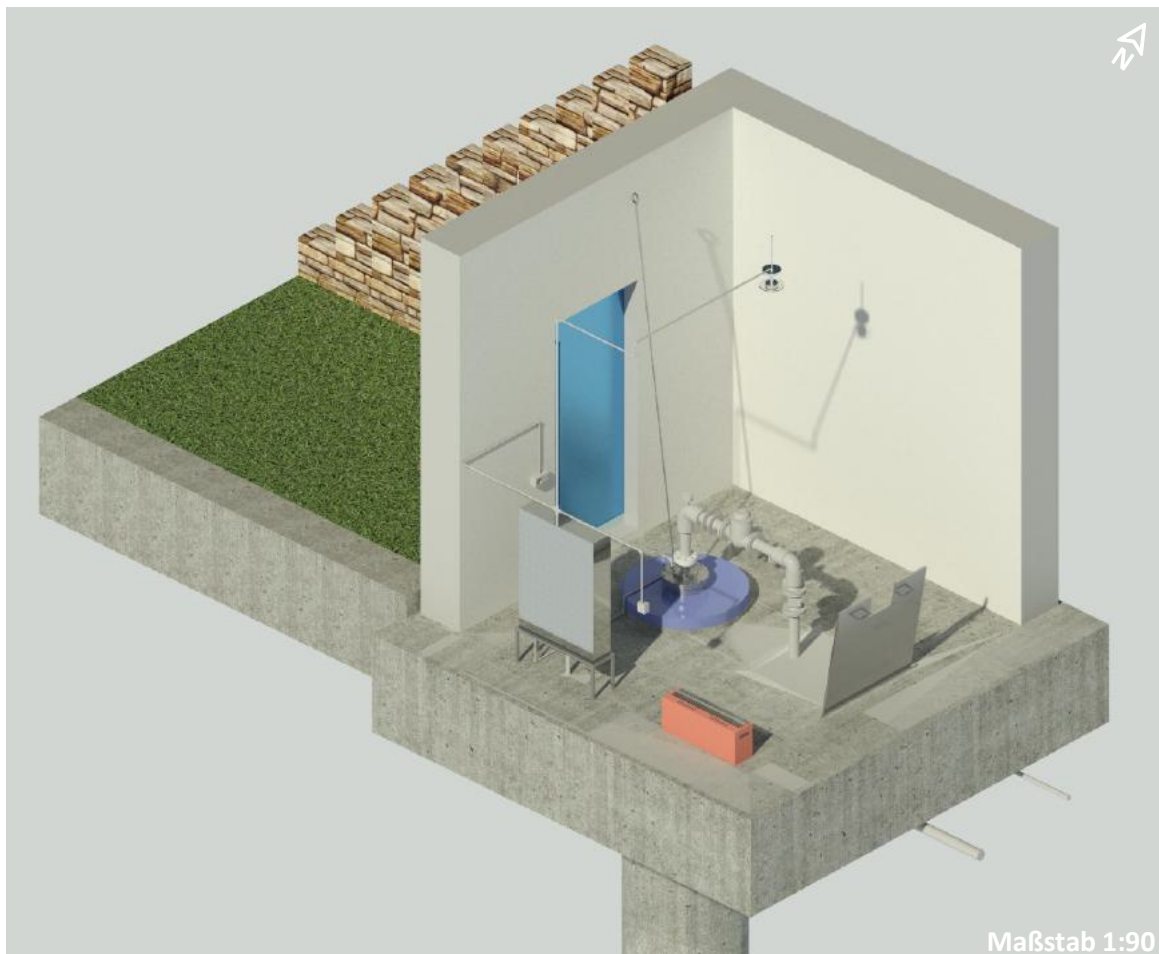


Abbildung 71: Offen geschnittenes Brunnenhaus (eigene Darstellung)

Rohrleitungen und Armaturen

Abbildung 71 veranschaulicht den Innenbereich des Brunnenhauses. Der Fokus liegt hierbei auf der technischen Gebäudeausrüstung. Die günstigste Arbeitshöhe für stehende Tätigkeiten liegt etwa zehn Zentimeter unterhalb des Ellbogens (DGUV 2019). Deshalb soll die Rohrleitung mit den Armaturen auf einer Höhe von 90 cm verlaufen. Der Brunnenkopf schließt 45 cm oberhalb des Fußbodens ab. Dadurch ergibt sich ein senkrechter Verlauf um weitere 45 cm, bevor die Leitung im 90°-Winkel abknickt. Auf dem horizontalen Abschnitt werden die Armaturen gemäß DVGW W 122 (A) integriert. Im Anschluss wird die Wasserleitung vertikal in den Schacht geleitet. Ein Meter unter der Erdoberfläche wird die Leitung aus dem Gebäude geführt.

Die enge Bauweise insbesondere im Gebäudeinnern der Brunnenstube basiert auf dem Zugeständnis gegenüber dem Grundstückseigentümer, dass nur ein kleiner Anteil der Ackerfläche beansprucht wird. Die ursprünglich verhandelte Grundfläche von 5 m mal 5 m ist jedoch aufgrund der Hochwasserschutzmaßnahmen um das Gebäude herum nicht realisierbar. Aufgrund dessen sollte umso mehr auf eine flächensparende Umsetzung geachtet werden. Denn eine geringere Ackerfläche ist für den Eigentümer gleichbedeutend mit finanziellen Einbußen infolge eines niedrigeren Ernteertrages. Ein finanzieller Ausgleich ist deshalb vertraglich festgeschrieben.

Die Modellierung der **Rohre** erfolgt in Revit im Reiter *Gebäudetechnik*. Die Rohre sind als DN 75 im Vorhaben geplant, in der Software ist jedoch nur DN 80 hinterlegt, weshalb auf diesen Durchmesser zurückgegriffen wird. Die benötigten Armaturen und Rohrzubehörteile müssen zunächst aus der Cloud in das Projekt geladen werden, weil diese Elemente nicht standardmäßig in der Vorlage

vorhanden sind. Zunächst werden die Rohrleitungen in Verbindung mit den 90°-Bögen im Projekt modelliert. Dementsprechend werden zuerst die Bögen oberhalb des Brunnenkopfes sowie die beiden Richtungsänderungen in der Achse des Schachtes modelliert und starre Rohre als Verbindung dazwischen eingefügt. Wie in Abbildung 71 zu sehen, wird im Ansatz gezeigt, an welcher Stelle die Leitungen aus dem Haus treten. Die Modellierung der eigentlichen Trasse erfolgt im Anschluss in InfraWorks, sobald alle Gebäude ins DGM importiert sind.



Abbildung 72: Innenansicht des Brunnenhauses (eigene Darstellung)

Abbildung 72 veranschaulicht die Wasserleitung mitsamt den notwendigen **Armaturen** aus einer anderen Perspektive. Die Reihenfolge ergibt sich aus DVGW W 122 (A), welche in Kapitel 2.2 erläutert wird. Die jeweiligen Armaturen finden sich in Revit unter dem *Rohrzubehör*. Das Manometer ist hier aufgrund fehlender Alternativen ohne Entlüftungshahn dargestellt. Auf dem ca. 80 cm langen, horizontalen Abschnitt ist ein Rückflussverhinderer, ein Wasserzähler sowie ein Probennahmehahn installiert. Letzterer wird um 90° gedreht und an der Rohrunterseite angebracht, sodass das Befüllen während der Probenahme leichter fällt. Über den Hahn lässt sich der Durchfluss optimal regulieren und zügig stoppen, sobald die Gefäße gefüllt sind. Der Wasserzähler ist in Revit etwas überdimensioniert hinterlegt, wodurch sich in Realität ggf. größere Freiräume zwischen den Armaturen ergeben als es das Modell widerspiegelt. Aufgrund der Platzverhältnisse wird der Absperrschieber auf dem vertikalen Leitungsabschnitt angebracht. Um eine angenehme Arbeitshöhe sicherzustellen, sollte dieser so hoch wie möglich installiert sein. Der Schieber soll mit einem Handrad gesteuert werden, um den Technikanteil der Anlage zu reduzieren und diese einfach zu gestalten, sodass die Bewohner im Notfall eigenständig die Wasserzufuhr stoppen können, ohne auf externe Experten angewiesen zu sein. Der Schieber sollte in dieser Bauweise zudem um 45° gedreht angebracht werden. Dies vermeidet, dass die Luke nicht mehr schließt bzw. öffnet. Gleichzeitig gewährleistet dieser Aufbau eine problemlose Probenahme am Hahn. Im Schacht der Brunnenstube befindet sich zugleich auch der tiefste Punkt der Trasse außerhalb des Brunnens. Um die Wasserleitungen im Gelände im Falle einer Wartung oder Betriebsstörung zu leeren, ist im Schacht eine Entleerungsmöglichkeit vorgesehen. Das anströmende Wasser kann direkt mit einer Pumpe abgesaugt und aus dem Gebäude ins nahegelegene Feld abgeleitet werden. Im Schacht wird für das Entleerungsventil symbolhaft ein nach unten geöffnetes *T-Stück* implementiert. Generell soll die Leitungsführung so gestaltet sein, dass sich der Brunnen, der Schacht und der Ausgang hin zur Trasse in einer Flucht befinden. Diese Anordnung vermeidet unnötige Krümmungen und somit potenzielle Druckverluste in der Leitung.

Elektrokomponenten

Ein **Schaltschrank** beinhaltet die Anlagentechnik der Pumpe sowie sämtliche Sicherungen des Gebäudes. Dieser wird zur besseren Visualisierung nach iranischer Bauart in Fusion 360 modelliert. Um die Technik vor Spritzwasser, das z. B. während der Entleerung der Leitungen entsteht, zu schützen, steht der Schaltschrank auf einem Gestell. Das Bauteil wird mit Hilfe von geometrischen Grundformen, die durch die Funktion *Extrusion* zu Körpern modelliert werden, erstellt. Als Material kommt für den Schrank Stahlblech zum Einsatz. Die restlichen Materialien werden nach optischen Präferenzen gewählt, um ein möglichst realistisches Element zu erhalten.



Abbildung 73: Schaltschrank des Brunnenhauses in Hesar im Vergleich mit der modellierten Version (eigene Aufnahme)

Als weitere Komponente steht ein elektrischer **Heizkörper** für den Bedarfsfall zur Verfügung, weil die Wasserleitungen und Armaturen nicht einfrieren dürfen, da sonst Schäden entstehen. Prinzipiell ist abzuklären, ob die Temperaturen in den Wintermonaten innerhalb des Gebäudes so tief fallen, da der Erdwall das Gebäude vor Kälte schützt. Dennoch erfolgt die Planung für den Fall, dass die notwendig ist, weil dies sonst in Vergessenheit gerät. In Revit sind lediglich konventionelle Heizkörper hinterlegt, weswegen auch dieses Bauteil in Fusion 360 erstellt wird. Der Heizkörper basiert auf einem gewöhnlichen Quader. Als Gitter wird ein Rahmen erstellt, welcher mit *Anordnung auf Pfad* entlang des zuvor geschaffenen Hohlraums vervielfältigt wird. Der Abstand zwischen den Gitterstäben soll 15 mm betragen. Außerdem werden Luftauslässe an der Oberseite sowie Griffe und eine Kabelbuchse an den Seiten erstellt.



Abbildung 74: Heizkörper in Hesar im Vergleich mit der modellierten Version (eigene Aufnahme)

Die Brunnenstube ist aufgrund des Erdwalls ohne Fenster geplant, wodurch **Kunstlicht** benötigt wird. Auch wenn die Montageluke im Dach und die Tür offen stehen, muss zu jeder Tages- und Jahreszeit gewährleistet sein, dass ausreichend Licht vorhanden ist, um beispielsweise die Armaturen abzulesen oder die Anlage warten zu können. Da der Raum relativ klein ist, reicht ein Oberlicht aus. Im Rahmen der Modellierung wird eine Pedelleuchte ausgewählt, deren Größe über *Typ bearbeiten* definiert wird. Die Beleuchtung wird möglichst in der Mitte der Decke platziert, jedoch mit einem ausreichenden Abstand zur Montageöffnung, sodass keine Schäden entstehen, wenn die Pumpe aus dem Brunnen gezogen wird. Für die Umsetzung vor Ort bedarf es nicht zwingend einen Lampenschirm. Vergleichbare Bauten in den Nachbardörfern verfügen meist nur über eine Glühbirne. Mit Hilfe des *Renderns* ergibt sich die Möglichkeit, das Gebäude nur bei künstlichen Lichtverhältnissen darzustellen, um so die Bedingungen im Innern aufzuzeigen (siehe Abbildung 98 im Anhang).

Steckdosen und **Lichtschalter** sind in diesem Gebäude Aufputz verbaut, d. h. die Steckdosen ragen etwas aus der Wand heraus. Beide Komponenten können aus dem Bereich *Elektro* in das Projekt geladen werden. Wie in Abbildung 72 zu sehen, befinden sich zwei Steckdosen und ein Lichtschalter

im Gebäude. Die Steckdose linker Hand des Schaltschranks dient als Anschluss für die elektrische Heizung oder die Pumpe, welche zum Abpumpen im Schacht platziert wird. Die zweite Steckdose neben der Tür ermöglicht die gleichzeitige Nutzung mehrerer elektrischer Geräte.

Für die Modellierung der Bauwerke wird stets die Vorlage *Architekturbau & Ingenieurbau* gewählt und nicht *Technische Gebäudeausrüstung*. Aufgrund dessen stehen nicht alle Funktionen uneingeschränkt zur Verfügung. **Stromkabel** können z. B. lediglich in zweidimensionalen Plänen wie dem Grundriss dargestellt werden. Die Alternative, die Leitungen über einen Stromkreis zu definieren, funktioniert aber im vorliegenden Fall ebenfalls nicht, da u. a. die Pumpe und der Schaltschrank keine von Revit erstellten Elektrokomponenten sind. Deshalb müssen die Stromleitungen in allen Gebäuden alternativ visualisiert werden. Da es sich hierbei primär um eine optische Verdeutlichung des Vorhabens handelt, um die Bauausführenden sowie die Projektpartner bestmöglich zu informieren, wird im Folgenden auf *Leerrohre* aus dem Bereich *Elektro* sowie *Rohrformstücken* als Verbindungselemente zurückgegriffen.

Die Modellierung der Stromkabel erfolgt direkt an den Wänden, wobei auf eine orthogonale Verlegung nach Vorgaben aus DIN 18015-1 geachtet wird. Im Gebäude erfolgt die Verbindung zwischen Pumpe, Steckdosen sowie Lichtschalter und Beleuchtung mit dem Schaltschrank. Das Stromkabel der Pumpe ist zwar wasserdicht, dennoch sollte es an der Brunnenabdeckung und dem Boden fixiert werden. Aufgrund der Stolpergefahr ist dieser Bereich farblich zu kennzeichnen. Für die Verbindung der *Leerrohre* kommen an den Verbindungsstellen sowohl *90°-Bögen* als auch ein *Kreuzstück* zum Einsatz. Des Weiteren muss eine Anschlussleitung zwischen dem Strommast und dem Schaltschrank eingeplant werden. Die Leitung wird senkrecht durch die Bodenplatte geplant und anschließend in Richtung Straße zum Mast verlegt. Aufgrund dessen müssen beim Bau bereits *Leerrohre* in der Bodenplatte berücksichtigt werden. DIN VDE 0100-520 empfiehlt, Stromkabel in einer Tiefe von 80 cm zu verlegen. Je nach Stand der Bauausführung können die Kabel gemeinsam in einer Trasse oder in zwei verschiedenen Trassen verlegt werden. Bei letzterer Variante sollte ein Abstand von mindestens einem Meter zu der Wasserleitung eingehalten werden, damit bei Grabungsarbeiten keine unbeabsichtigten Schäden entstehen. Für den Einbau der Stromleitung müssen iranische Standards beachtet sowie eine Genehmigung eingeholt werden. Diese wird in der Regel mit der Erlaubnis zum Pumpenbetrieb erteilt.

6.1.4. Topografie

Im Zuge des Hochwasserschutzes wird ein Erdwall um das Gebäude herum errichtet. Wegen der Gefahr des Hangrutsches darf der Böschungswinkel maximal 45° betragen (DIN 4124). Für den optimalen Schutz soll der Wall bepflanzt und mit Steinen befestigt werden. Zudem erstreckt sich die Böschung bis zur Unterkante des Daches. Dies ermöglicht außerdem den Zugang zum Dach und zur Montageluke, wobei Stufen in den Hang gegraben werden können, um den Aufstieg zu erleichtern. Um den ebenerdigen Zugang zum Gebäude dauerhaft sicherzustellen, sichern Stützmauern im Eingangsbereich den Wall. Darüber hinaus ist das Brunnenhaus einzuzäunen. Für den bestmöglichen Schutz im Falle eines Hochwasserereignisses ist der Schutzwall stromlinienförmig angelegt. Dies hat zur Folge, dass das anströmende Wasser nur einem geringen Strömungswiderstand ausgesetzt ist und seitlich am Bauwerk abgeleitet wird. Abbildung 97 verdeutlicht den Aufbau des Erdwalls.

Die Modellierung der Topografie erfolgt in Revit unter dem Reiter *Körpermodell & Grundstück*, wobei die Funktion *Gelände* ausgewählt wird. Über das Menü *Ändern* lassen sich im Grundriss einzelne Höhenpunkte manuell einfügen. Im ersten Schritt werden alle Nullpunkte gesetzt. Diese bilden die Endpunkte des **Erdwalls**. Aufgrund der händischen Verteilung der Höhenpunkte lässt sich der strom-

linienförmige Verlauf der Böschung simpel umsetzen. Zudem werden alle einzelnen Punkte mit individuellen Höhenangaben versehen, wodurch die Steigung beachtet werden kann. Generell ist bei der Ausführung auf den maximalen Winkel von 45° zu achten, der nicht überschritten werden darf. Es bietet sich an, die Punkte entlang von Höhenlinien um das Gebäude herum zu positionieren. In Summe werden bei diesem Modell, wie in Abbildung 75 zu erkennen, fünf verschiedene Höhenlinien modelliert.

Die beiden **Stützmauern** bestehen aus Naturstein und sind 30 cm breit. Aufgrund des abfallenden Walls wird die Höhe der Mauern stufenweise reduziert. Jede Stufe besitzt eine Höhe von 35 cm, sodass sich insgesamt zehn Abstufungen ergeben. Wegen des Untergrundes und der Frostgefahr muss unter jeder Mauer auch ein Fundament eingeplant werden. Dieses soll analog zu den Streifenfundamenten des Gebäudes ausgelegt werden.

Außerdem muss im Modell eine **Gebäudesohle** definiert werden. Diese verhindert, dass die Fläche im Eingangsbereich sowie im Gebäudeinneren vollständig mit der Topografie bzw. im Schnitt mit Erde ausgefüllt ist. Die *Gebäudesohle* lässt sich durch das Markieren der Wände ins Modell integrieren. Aus optischen Gründen wird die notwendige Sohle im Bereich zwischen den zwei Stützmauern mit einer Grasfläche überdeckt.

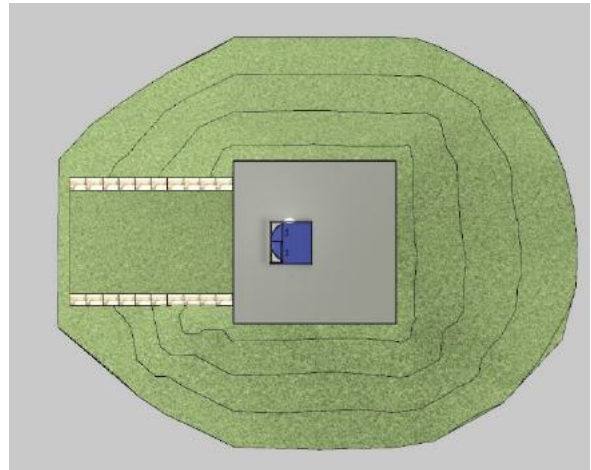


Abbildung 75: Stromlinienförmiger Hochwasserschutz
(eigene Darstellung)

6.2. Wasserspeicherung

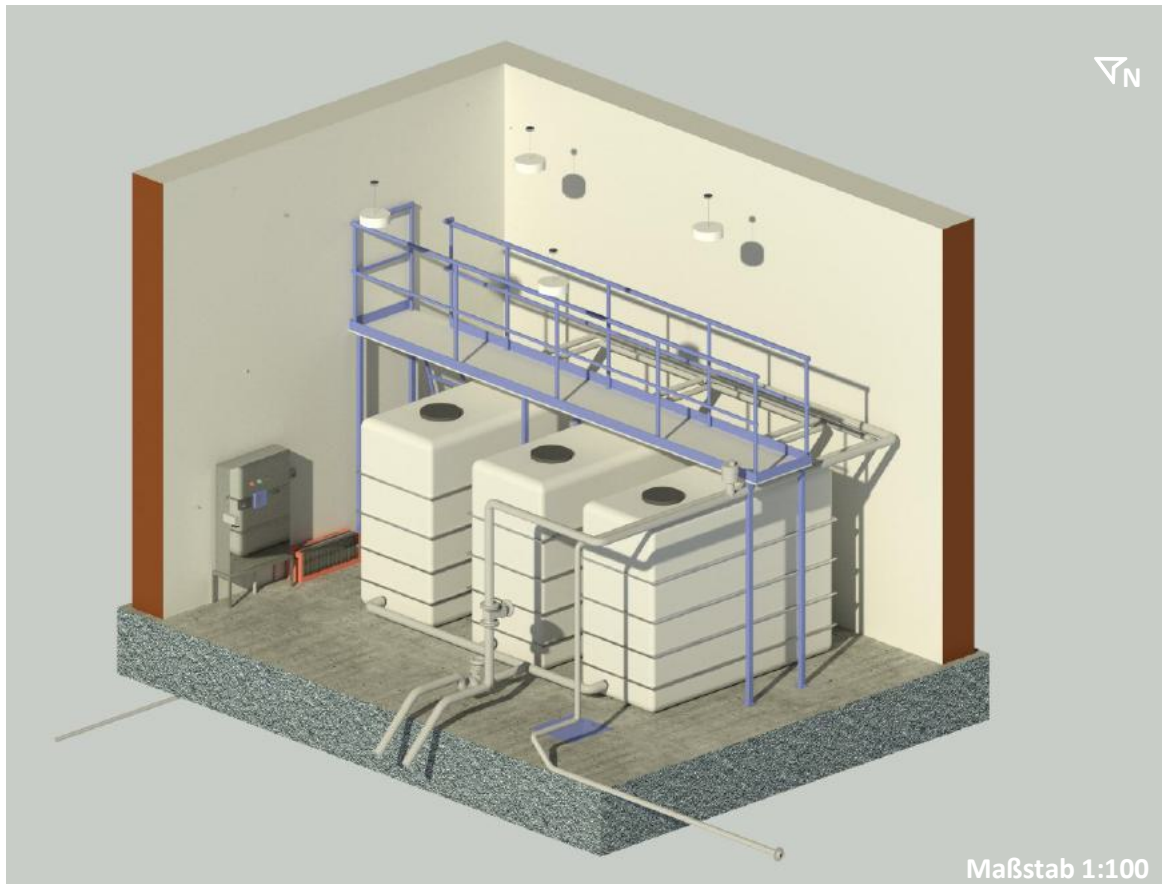


Abbildung 76: Offen geschnittenes Modell des Reservoirs (eigene Darstellung)

Das Reservoir dient dazu, Schwankungen des Wasserverbrauchs auszugleichen. Die Behälter sind so dimensioniert, dass auch bei Störfällen wie dem Ausfall der Pumpe oder bei Reparaturarbeiten den Bewohnern ausreichend Wasser bereitgestellt wird. Weiterhin gewährleisten die Hochbehälter, dass das Wasser mit dem erforderlichen Druck zur Verfügung steht. Anhand der Abbildung 76 erfolgt die Beschreibung der Modellierung, wobei für die grundlegenden Komponenten erneut auf die bereits erläuterten Vorgehensweisen der vorherigen Bauten verwiesen wird.

6.2.1. Gebäude

Die **Wände** des Bauwerks bestehen wie beim Brunnenhaus primär aus Naturstein, der als tragende Schicht dient. Alle erdberührten Bauteile müssen gemäß DIN 18533-1 abgedichtet werden. Die Raumhöhe beträgt 4,5 m.

Fundament

Aufgrund des hohen Gewichts, das bei den Behältern im gefüllten Zustand anfällt, muss ein Plattenfundament eingeplant werden. Diese wird in Revit im Bereich *Ingenieurbau* mit der Funktion *Platte* konstruiert. Im Eigenschaftenmenü wird zudem ein *Überstand* von 10 cm eingetragen. Dies bedeutet, dass das Fundament um diese Distanz über die Außenkante der Wände hinaus reicht, um für mehr Stabilität zu sorgen. Der genaue Aufbau des Fundaments ist Abbildung 77 zu entnehmen. Dabei ist zu erkennen, dass der ursprüngliche Typ *STB 400* modifiziert wird. Außerdem ist bereits in diesem Ausschnitt ein Vorteil der BIM-Anwendung sichtbar. Denn alle Materialien verfügen neben optischen auch immer über physikalische und thermische Eigenschaften, die im Rahmen der Tragwerksplanung oder der Energieanalyse verwendet werden.

Baugruppe bearbeiten

Familie: Bodenplatte
 Typ: STB 400
 Gesamtdicke: 0,6800 m
 Widerstand (R): 0,8591 (m²·K)/W
 Thermisch wirksame Masse: 887,28 kJ/(m²·K)

Schichten

	Funktion	Material	Dicke	Abschluss	Tragendes Material
1	Kern	Schichten oberhalb Kern	0,0000 m		
2	Tragende Schicht [1]	Ortbeton - bewehrt	0,4000 m	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
3	Nichttragende Schicht 1 [4]	Schwarze Wanne - Bitume	0,0300 m	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4	Nichttragende Schicht 1 [4]	Sauberkeitsschicht	0,1000 m	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5	Nichttragende Schicht 2 [3]	Kiesschüttung	0,1500 m	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6	Kern	Schichten unterhalb Kern	0,0000 m		

Einfügen Löschen Nach oben Nach unten

Abbildung 77: Eingabefenster des Plattenfundaments in Revit (eigene Aufnahme)

Öffnungen

Die **Türe** befindet sich an der Westseite des Gebäudes. Diese ist 2,5 m hoch und 2,0 m breit, um den Austausch der Wassertanks zu ermöglichen. Die zweiflügelige Tür öffnet nach außen, um im Gebäude mehr Platz zu haben und den Richtlinien einer Fluchttüre zu entsprechen. Während der normalen Nutzung soll nur eine Seite geöffnet werden. Aufgrund dessen wird die *Durchgangsbreite* jedes Flügels auf einen Meter geändert. Um die Behälter besser aus dem Gebäude transportieren zu können, wird der Winkel der *Türöffnung* von 90° auf mindestens 120° vergrößert. Für ein einfacheres Handling kann ebenfalls ein Türgriff am zweiten Flügel ergänzt werden.

Neben der Tür müssen drei Wandöffnungen für **Leerrohre** berücksichtigt werden. Der Durchmesser ergibt sich aus den Maßen der DN 75 Rohre. In Revit können horizontale Wandöffnungen, die nicht rechteckig sind, nicht über das Werkzeug *Öffnungen* erstellt werden. Stattdessen muss das Profil der entsprechenden Wand in einer Ansicht ausgewählt und bearbeitet werden. Hier können alle geometrischen Grundformen genutzt werden. Nach der Platzierung der kreisförmigen Skizzen muss die Änderung mit dem *grünen Haken* abgeschlossen werden. Geschieht dies nicht, bleiben alle anderen Elemente des Projektes ausgegraut und das Vorhaben kann nicht weiter modelliert werden. Alternativ können die Änderungen mit dem *roten Kreuz* abgebrochen werden. Bei positiver Rückmeldung an das Programm werden die Öffnungen automatisch im Wandprofil generiert.

Wenn im Schadensfall Wasser austritt, muss dieses aus dem Gebäude entfernt werden. Um dieses Prozedere zu vereinfachen, ist ein **Pumpensumpf** in Form eines Schachtes eingeplant. Wegen der beengten Platzverhältnisse besitzt der quadratische Schacht eine Kantenlänge von 0,5 m. Die Tiefe soll ebenfalls einen halben Meter betragen. Um die Unfallgefahr zu reduzieren, deckt eine Luke den Schacht ab. Deren Griffe sind in die Abdeckung eingelassen, wodurch keine Stolpergefahr besteht.

Dachaufbau

Neben der Eigen-, Wind- und Schneelast muss beim Gebäude der Wasserspeicherung auch die zusätzliche Auflast der Erde bei den Berechnungen einbezogen werden, weil das Reservoir in den Hang gebaut werden soll (siehe Abbildung 80), um insbesondere die hohen Temperaturen in den Sommermonaten abzumildern und die Statik zu verbessern. Aufgrund des erhöhten Gewichts wird das Dach aus Sandwichelementen mit einer zehn Zentimeter dicken Stahlbetonschicht in Form einer *tragenden Geschossdecke* überdeckt. Die Sandwichelemente werden, wie bereits erläutert, in Fusion 360 erstellt und an die jeweilige Dachfläche angepasst.

Tragwerk

Beim Reservoir kommen IPE-Stahlträger zum Einsatz, die als *Trägersystem* in Revit modelliert werden. Als *Verlegeregel* wird ein lichter Abstand von 0,53 cm und eine mittige Ausrichtung vorgegeben. Im

Anschluss werden die Träger manuell verschoben, um exakt mit den Betonträgern der Sandwich-elemente übereinzustimmen. Da ein Teil des Daches nicht mit Erde überdeckt ist, wird auch in diesem Fall eine Bitumendachbahn als Abdichtung nach DIN 18531-1 sowie eine Aluminiumbeschichtung zum Schutz vor Verwitterung und Sonneneinstrahlung implementiert.

6.2.2. Innenausstattung

Dieses Unterkapitel umfasst die Innenausstattung, welche aufgrund der wasserspezifischen Anlagen notwendig ist. Darunter fallen die Behälter und das Podest mit dem Laufsteg, die in Abbildung 76 dargestellt sind. Das Reservoir soll nicht in Form eines gemauerten Gebäudes direkt als Speicher dienen, sondern beinhaltet einzelne Kunststoffbehälter, die das Wasser aufnehmen. Weil in der Region eine hohe Erdbebengefahr besteht und bisher noch keine Informationen bezüglich der Untergrundverhältnisse am Standort des Reservoirs vorliegen, existiert ein hohes Risiko von Setzungen. Diese führen zu Rissen am Gebäude, weshalb die Dichtheit des Reservoirs in gemauerter Form nicht bedingungslos sichergestellt werden kann. Die Behälter aus Kunststoff ermöglichen zudem eine reibungslosere Wartung und einen Austausch einzelner Komponenten im laufenden Betrieb. Aus diesen Gründen liegt die Präferenz bei der Tanklösung, auch wenn die Wasserspeicher der umliegenden Dörfer stets aus gemauerten Reservoirs bestehen.

Behälter

Die quaderförmigen Wasserbehälter aus Polyethylen hoher Dichte (HDPE) entsprechen den Bedingungen zur Trinkwassernutzung. Alternativ können außerdem Behälter aus glasfaserverstärktem Kunststoff verwendet werden. Für die endgültige Wahl ist jedoch primär die lokale Verfügbarkeit entscheidend. Die exakten Maße, die zur Modellierung in Fusion 360 herangezogen werden, sind WTI (2023) zu entnehmen. Um die Kapazität von 12 m³ Brauchwasser, welche Eichhorn (2020) im ursprünglichen Konzept ermittelte, bereitzustellen, bedarf es drei Behälter, die jeweils über ein Volumen von 4.000 Litern verfügen.

Um den Tank zu modellieren, wird zunächst ein quaderförmiger Hohlkörper erstellt, dessen Wände 1 cm dick sind. Anschließend wird die Optik der Ecken und Kanten des Behälters mit dem Werkzeug *Abrunden* verbessert. Im Inneren wird zudem ein *Volumenkörper* erstellt, der den Wasserinhalt des Tanks darstellt. Weiterhin werden dünne Metallhalterungen modelliert, welche die verzinkten Rohrbandagen visualisieren. Diese vier Metallhalterungen sorgen dafür, dass der Behälter im gefüllten Zustand formstabil bleibt und verleiht diesen die nötige Stabilität. Wie in Abbildung 78 zu sehen, verfügt der Behälter über mehrere Öffnungen. Neben der Wartungsöffnung mit DN 400 besitzt der Tank auch ein Entleerungsventil. Des Weiteren existieren drei Öffnungen für Leitungen mit DN 50. Die erste soll als Inlet des Brauchwassers genutzt werden, die zweite als Überlauf des Tanks und die dritte für den im Behälter integrierten Schwimmer. Dadurch dass In- und Outlet des Wasserbehälters an unterschiedlichen Seiten liegen, bilden sich keine Totwasserzonen aus. Sämtliche Abdeckungen der Öffnungen sind als *Vollzylinder* modelliert. Die entsprechenden *Materialien* werden bereits in Fusion hinzugefügt.



Abbildung 78: Vergleich des Wasserbehälters (WTI 2023) mit der modellierten Version (eigene Darstellung)

Podest

Dieses Bauteil wird mit den passgenauen Maßen in Fusion 360 erstellt. Zunächst erfolgt die Modellierung des Stegs, der in einer Höhe von 2,30 m quer über die Behälter und die gesamte Breite des Gebäudes verläuft. Die lichte Breite erfüllt mit 0,75 m die nach DIN 18799-1 geltenden Bestimmungen. Insgesamt sechs Stützen tragen das Konstrukt, wobei darauf zu achten ist, dass bei Bedarf der Austausch der Tanks möglich sein muss. Die Stützen basieren auf einer rechteckigen *Skizze* und werden mit der Lauffläche verschweißt. Mit Hilfe einer Endplatte werden die Stützen im Boden verschraubt. Mit der Funktion *Ableitung einfügen* können die bereits für den Brunnenkopf erstellten Schrauben innerhalb des Programms in das neu erstellte Objekt importiert werden. Die Steigleiter wird in einem Winkel von 75° angebracht, um den Auf- und Abstieg zu erleichtern. DIN 18799-1 schreibt einen Holmabstand von 50 cm sowie einen Sprossenabstand von 25 cm vor, wobei die Distanz zwischen Boden und der ersten Sprosse nicht 15 cm übersteigen soll. Da die Höhe niedriger als drei Meter ist, bedarf es keiner speziellen Absturzsicherung. Die *Zylinder* der Holme und die *Quader* der Stufen messen jeweils 4 cm, um diese besser greifen zu können. Aus Gründen der Arbeitssicherheit ist ein Geländer zur Absturzsicherung notwendig. Dieses muss aus einem Handlauf auf 1,10 m Höhe, einer Knieleiste auf 0,60 m und einer 10 cm hohen Fußleiste bestehen (ASR A 2.1). Um den Zugang zu den Tanks von oben zu gewährleisten, ohne die Arbeitssicherheit zu gefährden, werden die Querstreben mit herausnehmbaren Schnappverbindungen realisiert. Um das Greifen zu erleichtern, werden die Handläufe sowie die vertikalen Streben am Übergang zur Steigleiter rund modelliert. Die Knieleiste sowie die Fußleiste werden dagegen eckig dargestellt. Aus ästhetischen Gründen werden die markanten Flächen blau lackiert. Lediglich der Laufsteg ist grau visualisiert, um zu verdeutlichen, dass die Lauffläche rutschhemmend auszuführen ist.

6.2.3. Technische Gebäudeausrüstung

Rohrleitungen

Die Rohrleitungen des In- und Outlets müssen nach Aussagen der Oberen Wasserbehörde Zanjans oberirdisch in das Reservoir eintreten. Dies erfordert eine Rohrdämmung in dem Teilabschnitt, weil kein Frostschutz mehr gewährleistet ist. Die PE-Rohre des **Zulaufs** mit DN 75 verlaufen an den Innenwänden des Gebäudes und unterhalb des Podests entlang, damit die Leitungen stabil befestigt werden können. Im Zuge der Aufteilung des Stroms in die drei Behälter reduziert sich der Rohrdurchmesser auf DN 50, weil die Öffnungen der Wassertanks diese Maße besitzen. Alternativ lassen sich die Öffnungen der Behälter auch auf DN 75 vergrößern. Letztendlich hängt dies auch von den tatsächlich beschafften Behältern ab. Der **Ablauf** in Richtung Sammel-schacht wird ebenfalls in DN 75 ausgeführt. Da die Rohre unten an den Tanks austreten, verlaufen die Leitungen auf Höhe des Fußbodens. Dementsprechend sollten die Personen mit Markierungen auf die Stolpergefahr hingewiesen werden. Über Armaturen, die im Folgenden genauer erläutert werden, werden die drei Ströme erneut zusammengeführt und über einen Leitungsstrang in Richtung Dorfmitte abgeleitet. Die Rohre des **Überlaufs** sind im hinteren Gebäudeteil unterhalb des Zulaufs und parallel zu diesen Leitungen verlegt. Um unnötige Knicke in der Leitung zu vermeiden, wird diese in der südwestlichen Ecke des Gebäudes aus dem Bauwerk geleitet. Der oberirdische Ablauf wird in einem 45°-Winkel modelliert. Um diesen zu erreichen, muss der *Winkel* des Rohrformteiles im *Eigenschaftenmenü* angepasst werden. Der Vorteil eines oberirdischen Ablaufs liegt darin, dass das überschüssige Wasser unmittelbar in den angrenzenden, natürlich gebildeten Abfluss des Hangs geleitet wird. Außerdem bemerken die Dorfbewohner dadurch sofort, wenn die Behälter überlaufen und somit die Anlage nicht vorschriftsmäßig funktioniert. In diesem Fall können sie schneller Ursachenforschung betreiben und ggf. die Pumpe manuell abschalten. Der Überlauf ist so angelegt, dass dieser gravimetrisch bzw. über den Druck des überlaufenden Wassers betrieben wird.

Armaturen

Um eine sichere Wartung oder Reparatur durchführen zu können, werden an den beiden Hauptleitungen des Zu- und Ablaufs **Absperrschieber** installiert. Die Bedienung erfolgt mit einem Handrad.

Beim Inlet befindet sich der Schieber auf einer angenehmen Arbeitshöhe von einem Meter, beim Outlet dagegen auf dem Boden in der Nähe der Wand. Beim Zu- und Ablauf sowie beim Überlauf sind des Weiteren **Mehrwegeventile** eingeplant. Diese müssen so schaltbar bzw. verschließbar sein, dass stets alle potenziellen Wege funktionieren. Denn jeder einzelne Behälter muss zu Reinigungs- oder Wartungszwecken einzeln abschaltbar sein, während der laufende Betrieb durch die verbleibenden zwei Behälter gesichert ist. Die Mehrwegeventile stellen dabei sicher, dass alle Kombinationen zu jeder Zeit möglich sind. Das zugrundeliegende Konzept sieht darüber hinaus auch eine **Entlüftungsmöglichkeit** am Hochpunkt vor (Eichhorn 2020). Dementsprechend wird nahe dem Laufsteg am höchsten Punkt der Hauptleitung ein *Automatik-Entlüfter* installiert. Um die oberirdisch austretende Rohrleitung des Überlaufes vor Bewuchs, Schmutz und Tieren zu schützen, wird eine sog. **Froschklappe** eingeplant. Dieses Bauteil liegt jedoch nicht in der Revit-Bibliothek vor, weshalb stattdessen symbolhaft eine *Rückschlagklappe* in die Modellierung aufgenommen wird.

Elektrokomponenten

Wie beim Brunnenhaus (vgl. Kapitel 6.1.3) impliziert das Konzept eine **Notheizung**, die zum Einsatz kommt, wenn die Temperaturen unter den Gefrierpunkt fallen. Des Weiteren verfügt das Reservoir über einen **Schaltschrank** in derselben Bauart wie in der Brunnenstube.

Da das Gebäude infolge der Überdeckung mit Aushubmaterial über keine Fenster verfügt, welche natürliches Licht gewähren, muss auf eine künstliche **Beleuchtung** zurückgegriffen werden. Obwohl die Grundfläche des Reservoirs im Vergleich zum Brunnenhäuschen nicht bedeutend größer ausfällt, werden dennoch vier Lampen installiert. Grund dafür ist, dass für die Reparatur, Wartung und Instandhaltung der Leitungen innerhalb des Gebäudes in beinahe allen Bereichen des Raumes ausreichend Licht benötigt wird. Außerdem ist es für die Arbeitenden sicherer, wenn die Bereiche gut ausgeleuchtet sind. Die Modellierung erfolgt in Revit mit Hilfe von runden *Pendelleuchten*, die an der Decke angebracht sind. Diese werden händisch platziert und in einer Flucht ausgerichtet. Eine Nachjustierung kann anhand der verschiedenen Seitenansichten im dreidimensionalen Modell erfolgen. Über die Funktion *Rendern* wird geprüft, ob die Innenraumbeleuchtung ausreicht. Dabei sollten die Regelungen von ASR A 3.4 hinsichtlich der Beleuchtung am Arbeitsplatz in die Planungen miteinbezogen werden. Allerdings muss die Umsetzung vor Ort mit den lokal zur Verfügung stehenden Materialien und der üblichen Nutzung durchgeführt werden. Der Fokus liegt aber dennoch auf einwandfreien Sicht- und Arbeitsverhältnissen.

Der **Lichtschalter** ist neben der Eingangstür als *Doppeltaster Aufputz* montiert. Dies ermöglicht, nur einen Teil der Beleuchtung einzuschalten, wenn z. B. lediglich die Kontrolle des Schaltkastens von Nöten ist. Außerdem beinhaltet die Planung zwei Steckdosen. Diese sind neben der Tür sowie neben dem Schaltschrank angebracht. Letztere dient hauptsächlich für den Anschluss des elektrischen Heizkörpers.

Um die Elektrokomponenten zu verbinden und mit Strom zu versorgen, bedarf es der Verlegung von **Stromleitungen**. Neben der Beleuchtung müssen auch die Steckdosen und Lichtschalter mit dem Schaltschrank verknüpft werden. Außerdem erfolgt der Anschluss der drei Schwimmerschalter über den Schaltschrank. Diese müssen zudem einzeln abschaltbar sein, wenn die jeweiligen Behälter außer Betrieb sind. Die Modellierung in Revit gestaltet sich aufgrund der programmspezifischen Eigenheiten schwierig, weshalb die Kabel mit Hilfe von *Leerrohren* und *Rohrformteilen* visualisiert werden. Die Kabel der Schwimmer werden in einer Kabeltrasse zusammengefasst. Um Kreuzungen mit den Wasserleitungen und somit eine potenzielle Kurzschlussgefahr zu vermeiden, werden die Stromleitungen unterhalb des Podests entlang des Laufstegs in Richtung Schaltschrank geführt. Die restlichen Leitungen werden gemäß DIN 18015-1 orthogonal verlegt, wobei auf kurze Leitungswege geachtet wird. Der Anschluss zwischen Schaltschrank und Strommast soll frostsicher gestaltet sein. DIN VDE 0100-520 empfiehlt, eine Tiefe von 80 cm einzuhalten. Eine vertikale Ausführung erfordert ein Leerrohr während des Baus einzubringen. Im Modell muss deshalb eine *Schachtöffnung* mit kreisförmiger Begrenzungslinie ausgewählt werden. Dabei sollte sichergestellt sein, dass sich die

Öffnung lediglich auf das Fundament und nicht das gesamte Gebäude bezieht. Um dies zu verhindern, kann der Anwender die zu Beginn definierten Ebenen als Grenzen im *Eigenschaftenmenü* einstellen.

Kommunikation zwischen Schwimmer und Pumpe

Aufgrund des intermittierenden Betriebs der Pumpe benötigt es eine reibungslose Kommunikation zwischen dem Reservoir und dem Brunnenhaus. Denn abhängig von dem vorliegenden Wasserstand in den Speicherbehältern, soll sich die Pumpe im Brunnen automatisch an- bzw. abschalten. Für die Informationsbeschaffung sind im Inneren der Tanks **Schwimmerschalter** installiert. Diese basieren auf einem Kunststoffgehäuse, wodurch der Schwimmer infolge des Auftriebs immer an der Wasseroberfläche treibt. Eine frei bewegliche Kugel verändert ihre Position in Abhängigkeit des Neigungswinkels des Schwimmers und insofern auch des Wasserstandes in den Behältern (Donner 2023). Die Stahlkugel dient dabei als Schalter für den integrierten Stromkreis. Dadurch lässt sich die Pumpe automatisch steuern.



Abbildung 79: Querschnitt eines Schwimmerschalters (Donner 2023)

Für die Kommunikation kommen verschiedene Systeme infrage. Die beste Möglichkeit stellt die Datenübertragung mittels **Signalkabel** dar. Im Optimalfall wird dieses mit den Rohrleitungen in der Trasse verlegt. Alternativ kann dieses auch oberirdisch an den Strommasten bis zum Brunnen verlaufen. Weil das Kabel des Schwimmerschalters nicht für die lange Distanz ausgelegt ist, müssen zusätzlich Relais im Schaltschrank verbaut werden.

Als zweite Möglichkeit kann stattdessen ein **Druckschalter** im Leitungsnetz in der Nähe der Pumpe implementiert werden. Dieser schaltet die Pumpe ein, wenn der minimale Wasserstand im Speicher erreicht ist und schaltet diese beim maximalen Füllstand wieder ab. Aufgrund der Behälterhöhen ergibt sich eine Höhendifferenz von ca. zwei Metern, respektive 0,2 bar. Gleichzeitig muss der Druckschalter für einen Druck von bis zu 8 bar ausgelegt sein. Dieser resultiert aus den unterschiedlichen Höhenlagen des Reservoirs und des Brunnenhauses, wobei auch auf einen Sicherheitsfaktor zu achten ist. Dies bedeutet, dass der Druckschalter sehr fein justiert werden muss. Finanzierbare Drucksensoren verfügen bestenfalls über eine Differenz zwischen Ein- und Ausschalt-Druck von 0,3 bar (Agora-tec GmbH 2023). Andere Hersteller bewegen sich beim Einschalt-Druck in einem Rahmen, der im vorliegenden Fall nicht zielführend ist (Neumüller 2023). Demzufolge muss für diese Lösung zunächst der lokale Markt sondiert werden, ob in Iran ein Drucksensor zur Verfügung steht, der allen Bedingungen des Betriebs der Anlage entspricht, ohne dabei hohe Kosten zu verursachen.

Als dritte Option ist es möglich, die Kommunikation zwischen den beiden Komponenten via **Funkübertragung** zu realisieren. Eine drahtlose Datenübertragung ließe sich über diese Wegstrecke z. B. mit Hilfe von Radiowellen umsetzen. Jedoch birgt eine Funkübertragung auch gewisse Risiken. Im Vergleich zur leitungsgebundenen Datenübertragung ist die Funkverbindung anfälliger hinsichtlich der Geschwindigkeit, der Stabilität sowie der Datensicherheit. Es können Sicherheitslücken entstehen und unerwünschte Zugriffe von Dritten erfolgen, wobei zudem die Möglichkeit von Verbindungsproblemen besteht. Die Versorgung der Dorfbewohner mit Trink- und Brauchwasser zählt zu den kritischen Infrastrukturen, deren sensiblen Daten geschützt werden müssen. Probleme bei der Wasserversorgung schränkt die Lebensqualität der Bewohner ein. Dies gilt es zu vermeiden, weshalb diese Lösung als letzte Möglichkeit angesehen wird.

6.2.4. Topografie

Die Projektbeteiligten planen, das Reservoir halb in den Hang einzugraben. Dies verspricht eine kühlende Wirkung, um so das gespeicherte Wasser vor den hohen Temperaturen in den Sommermonaten zu schützen. Darüber hinaus wird durch diese Bauweise die Gefahr eines Hangrutsches gemindert und eine höhere Standsicherheit gewährleistet. Trotz der höheren Auflast infolge der Erde, die auf das Dach des Gebäudes wirkt, überwiegen die statischen Vorteile dieser Variante.

Für die Modellierung werden wie zuvor zunächst die *Nullpunkte* gesetzt. Diese befinden sich in diesem Fall nur an der Westseite des Bauwerks, an der die Tür und die Rohrleitungen angebracht sind. Vor dem Gebäude ist ein kleines Plateau einzurichten, damit ein ebenerdiger Zugang problemlos möglich ist. Die weiteren Höhenpunkte werden in Form von *Höhenlinien* um das Gebäude herum positioniert. Als Material wird helle, sandige *Erde* gewählt, weil sich dieses Bodenmaterial aus der bergigen Umgebung ergibt. Abbildung 80 zeigt eine Außenansicht des Gebäudes.

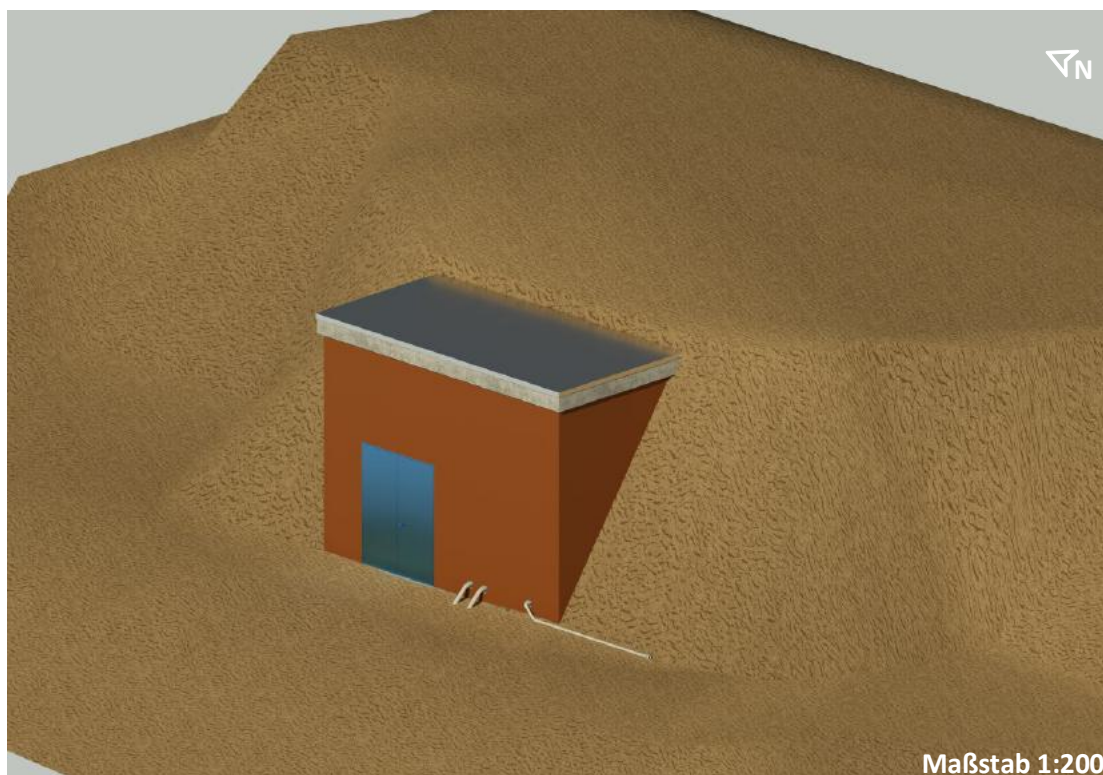


Abbildung 80: Bau des Reservoirs in den Hang (eigene Aufnahme)

Das Bauwerk wird zum Teil mit Erde überdeckt. Dies bedeutet, dass das Werkzeug *Gebäudesohle* nicht verwendet werden kann. Dies hat zur Folge, dass im Gebäudeinneren die Topografie weiterhin sichtbar bleibt und der Raum gemäß den Höhenlinien mit Erde gefüllt dargestellt wird. Die Software bietet für dieses Visualisierungsproblem bisher keine Lösung an, weil die Topografie nicht als Festkörper modelliert wird und alternative Darstellungsformen zu Berechnungsfehlern führen (Autodesk 2019). In diesem Fall können Außenansichten mit der modellierten Topografie dargestellt werden. Für die Innenansichten und Schnitte muss die *Sichtbarkeit* des Geländes allerdings deaktiviert werden, um eine sinnvolle Visualisierung des Reservoirs zu erhalten. Trotz alledem verdeutlicht die Mischung beider Ansichtsformen den Projektbeteiligten und Bauunternehmern die Absichten und verbessert die Vorstellung, wie das Gebäude realisiert werden soll.

6.3. Wasseraufbereitung



Abbildung 81: Außenansicht des Gebäudes der Wasseraufbereitung (eigene Darstellung)

Das in diesem Kapitel beschriebene Bauwerk, beinhaltet die Umkehrosmoseanlage, die das salzhaltige Grundwasser zu Trinkwasserqualität aufbereitet. Außerdem dient es als Lager für die bereits erworbenen Ersatzteile und -materialien. Der grundsätzliche Aufbau entspricht der üblichen Bauart aller vorherigen Gebäude, weshalb auf die entsprechenden Kapitel verwiesen wird, um eine Dopplung der Ausführungen zu vermeiden. Details bei der Modellierung, welche von der bisherigen Bauweise abweichen, werden dagegen im Folgenden genauer erläutert.

6.3.1. Gebäude

Wände

Da das Bauwerk ohne topografische Besonderheiten errichtet wird, kann auf eine Abdichtung im Bereich der Wände verzichtet werden. Dadurch erfolgt die Modellierung anhand einer 35 cm dicken Wand aus *Sichtmauerwerk*, welche die tragende Schicht darstellt. Innen und außen wird eine Putzschicht aus Gips bzw. Lehm aufgetragen. Der innere Grundriss des Gebäudes beträgt 3m mal 5 m. Um eine erdbebensichere Bauweise zu beachten, tragen vier *Stützen* in den Gebäudeecken zur Stabilität bei. Diese Stützen aus Stahlbeton sind sowohl mit der Bewehrung des Fundaments als auch mit der Bewehrung der umlaufenden Dachkonstruktion verbunden.

Fundament

Das Streifenfundament wird mit Hilfe der Funktion *Fundament – Wand* konstruiert. Die Breite beläuft sich auf 55 cm, sodass ein beidseitiger *Versatz* von 8,5 cm vorliegt. Dies stellt eine bessere Abtragung der wirkenden Kräfte sicher. Die Höhe des Fundaments beträgt 60 cm. Dies gewährleistet zwar keinen hundertprozentigen Frostschutz, jedoch basiert diese Bauweise auf den lokalen Erfahrungen.

Vorsprung

Die Häuser Hamzehloos verfügen alle über einen zusätzlichen Vorsprung im Bereich der Eingangstür. Den Bewohnern zufolge dient dies als potenzieller Überschwemmungsschutz und verhindert, dass Wasser eindringt. Die Modellierung erfolgt anhand nichttragender Wände aus *Sichtmauerwerk*. Diese sind 20 cm dick, wobei der Innenraum mit Aushubmaterial, im Modell mit *Erde*, gefüllt wird. Der Vorsprung, der sich über die gesamte Gebäudeseite erstreckt, ist einen halben Meter hoch und einen Meter breit. Als Abhängigkeiten wird im Eigenschaftenmenü die *Ebene UK-EG* sowie ein manueller *Versatz* von 0,5 m eingetragen. Eine *Geschossdecke* bildet dabei eine glatte Oberfläche.

Bodenplatte

Aufgrund der hohen Last des gefüllten Trinkwasserbehälters und der Wasseraufbereitungsanlage bedarf es einer tragenden Bodenplatte, die als *Geschossdecke* modelliert wird. Unterhalb der tragenden Schicht, die aus 15 cm *Stahlbeton* besteht, befindet sich eine *Bitumenabdichtung* sowie eine *Sauberkeitsschicht* aus unbewehrtem Ortbeton. Darunter schließt eine 15 cm mächtige *Kiesschüttung* an, wobei zudem weitere 12 cm mit *Erde* modelliert sind, um einen gemeinsamen Abschluss an der Unterkante des Streifenfundaments zu bilden.

Öffnungen

Die **Tür** des Gebäudes besteht aus zwei Flügeln und soll sich nach außen öffnen, damit der Austausch der Anlage sowie des Wasserbehälters möglich ist. Die Modellierung erfolgt wie zuvor beim Reservoir, wobei hier darauf zu achten ist, dass die linke Tür häufiger genutzt werden soll und der rechte Flügel nur bei Bedarf genutzt wird. Dies liegt daran, dass sonst die Tür den Zugang zur Zapfstelle einschränkt.

Die Maueröffnung für das **Bedienterminal** beginnt 0,75 m oberhalb des Vorsprungs und umfasst eine quadratische Fläche mit einer Kantenlänge von ebenfalls 0,75 m. Da es sich um eine rechteckige Öffnung handelt, kann das Werkzeug *Wandöffnung* im Bereich *Ingenieurbau* für diesen Schritt verwendet werden. Das Bedienfeld befindet sich aufgrund der Bauweise auf einer Höhe von einem Meter, wodurch es sich gut bedienen lässt.

Im Gegensatz zu den bisherigen Bauwerken ist bei diesem Gebäude ein **Fenster** eingeplant. Dieses besitzt eine 50 cm mal 50 cm große Fläche und soll sich an der Westseite ca. zehn Zentimeter unterhalb des Daches befinden. Denn dadurch wird – nach Vorbild vergleichbarer Bauten, wie beispielsweise in Hesar – sichergestellt, dass der Luftaustausch durch den Wind gewährleistet ist. Im *Eigenschaftenmenü* können bestimmte Parameter des Bauteils verändert werden. Die *Einbautiefe* soll 15 cm betragen, wobei der *Wandaufbau außen* auf 1 cm reduziert wird, damit eine Tropfkante vorliegt, jedoch keine klassische Fensterbank. Außerdem können im Menü die *Materialien* der einzelnen Komponenten festgelegt werden. Der Rahmen besteht aus Aluminium, während für die Scheibe Glas gewählt wird.

Um die Leitungsanbindung zwischen Sammelschacht und Aufbereitungsgebäude frostsicher zu gestalten, wird ein **Schacht** im Inneren des Bauwerks gebaut. Dieser besitzt eine quadratische Grundfläche von 1 m² und eine Tiefe von 1,1 m. Im Gegensatz zum Brunnenhaus ist dieser Schacht jedoch um 10 cm erhöht, damit z. B. bei einem Leck oder beim Putzen kein Wasser eindringt. Dennoch kann dieser Schacht auch als Pumpensumpf dienen, wenn größere Wassermengen austreten. Das übrige Wasser kann ebenerdig durch die Tür abgeleitet werden. Der Schacht wird mit einer **Bodenluke** abgedeckt, um die Arbeitssicherheit zu gewähren. Diese wird nach dem Vorbild der Brunnenstube modelliert. Allerdings weist die Luke der Aufbereitungsanlage eine seitliche Öffnung auf, durch welche die Rohrverbindungen laufen (siehe Abbildung 85). Aufgrund der Leitungen, die an der Wand verlaufen, muss ein Abstand zu diesen eingehalten werden, um keine Kollision zwischen den Komponenten zu verursachen.

Dachaufbau

Das Dach besteht wie gehabt aus Sandwichelementen, die entsprechend dem Grundriss zusammengefügt werden. Der Aufbau ist wegen des Vordaches zweiteilig, d. h. über dem Gebäudeinneren werden neun Reihen längs verlegt, während das Vordach aus zwei Querreihen besteht. Neben der konventionellen Dachumrandung wird auch der Bereich oberhalb der nördlichen Außenwand, die den Übergang zum Vordach darstellt, mit einer Bewehrung versehen. Dadurch verbessert sich die Statik und Stabilität des Bauwerks, weil die Lasten gezielter über die Wände in das Fundament bzw. den Baugrund abgetragen werden können. Als abschließende Schicht kommt erneut eine Bitumen-

abdichtung mit einer Aluminiumbeschichtung zum Einsatz, die auch handbreit über den Rand hinaus ragt.

Tragwerk

Das Tragwerk besteht aus IPE-Trägern, wobei das *Verlegesystem* bei der Modellierung wie beim Reservoir angewandt wird. Die Stahlträger werden dabei an die Positionen der Sandwichelemente und deren Betonträgern angepasst.

Fliesen

Statt einem glattgestrichenen Betonfußboden sollen beim Gebäude der Wasseraufbereitung Fliesen Anwendung finden. Diese dienen als Spritzschutz und stellen den typischen Ausbau vor Ort dar, welcher auch ausdrücklich von den Bewohnern gewünscht ist. Neben der Ergänzung des Fußbodenaufbaus werden die Fliesen auch an der Wand bis in 50 cm Höhe angebracht. Für die Modellierung wird dafür ein neuer *Wandtyp* erstellt. Dieser ist nichttragend und besitzt eine Wandstärke von 1 cm, der sich aus der Fliese und der darunter angebrachten Ausgleichsmasse zusammensetzt. Die neu erstellte Wand wird dabei direkt an die Kante der tragenden Wand ergänzt. Darüber hinaus wird für den Fußboden eine nichttragende *Geschossdecke* erstellt, die ebenfalls aus einer Schicht Fliesen und der Ausgleichsmasse besteht.

Treppe

Die Treppenstufen werden im Bereich *Erschließung* modelliert. Die Treppenbreite wird dabei im *Eigenschaftenmenü* so angepasst, dass die Stufen bis hin zur Zapfstelle verlaufen. Die Auftrittsbreite und Stufenhöhe sind in Revit gemäß DIN 18065 hinterlegt. Aufgrund der vor Ort verwendeten Bautechnik wird das Material verändert. Es kommen für die Stufen Natursteinziegel zum Einsatz, während die Oberfläche der Stufen aus glattgestrichenem, unbewehrtem Ortbeton besteht. Die Funktion *Treppe* generiert automatisch ein Geländer an beiden Seiten der Treppe. Zwar ist diese Bauweise im Dorf nicht sehr verbreitet, dennoch bietet sie insbesondere der alternden Bevölkerung eine gute Hilfestellung. Für den besseren Komfort wird das Geländer an der linken Seite der Treppe bis zur Außenwand des Gebäudes verlängert. Dies geschieht in Revit mit Hilfe der Funktion *Geländer*. Auch für diesen ein Meter langen Abschnitt werden *vertikale Stäbe* verwendet, um ein einheitliches Bild zu schaffen. Die Ecke an der gegenüberliegenden Seite soll dagegen frei bleiben, da sich dort eine gute Sitzgelegenheit anbietet. Dadurch ergibt sich neben der Trinkwasserabholung auch Raum für Gespräche mit Bewohnern umliegender Dörfer, Touristen oder dem Grabungsteam, sodass das Gebäude als Treffpunkt auch zum sozialen Zusammensein beiträgt.

Rampe

Als temporäre Lösung ist bei diesem Gebäude auch eine mobile Holzrampe eingeplant (siehe Abbildung 99 im Anhang). Sie zeigt einen Ansatz für Barrierefreiheit und zukünftige, kostengünstige Lösungen für die alternde Bevölkerung. Zurzeit erscheint die Umsetzung eher unrealistisch, dennoch soll das Vorhaben auch Anreize und Perspektiven für die Zukunft bieten. Die Steigung der Rampe soll 15 % betragen. Diese kann gemäß DIN 18040-1 von einem Rollstuhlfahrer mit einer schwachen Hilfsperson überwunden werden. Eine niedrigere Steigung ist nicht umsetzbar, weil sonst die Rampe für eine sinnvolle mobile Nutzung zu lang wird. Die Rampe ist jedoch nicht nur für die Barrierefreiheit, sondern auch als Hilfestellung für den einfacheren Transport der Komponenten, wie den Tank und die Aufbereitungsanlage, gedacht, wenn diese ausgetauscht werden müssen.

Die Modellierung erfolgt in Fusion 360. Die Gesamthöhe, die zu überwinden ist, beträgt 55 cm. Bei einer Steigung von 15 % ergibt sich eine Gesamtlänge von 3,67 m. Die Breite der Rampe soll 2,0 m betragen, damit Personen während des Transports an beiden Seiten der Anlagenkomponenten beim Tragen helfen können. Für eine bessere Lagerung der Rampe, soll diese demontierbar sein und aus verschiedenen Einzelteilen bestehen. Das Geländer an beiden Seiten ist abnehmbar und die Unterkonstruktion besteht aus zwei separaten Elementen. Die Rampenfläche soll eine Platte sein, die

in der Hälfte mit Gelenken umgeklappt werden kann. Die Komponenten bestehen alle aus *Quadern*, die mit dem Werkzeug *Kombinieren* miteinander verbunden werden. Aufgrund des Steigungswinkels ergeben sich Teile, die von der Unterkonstruktion über die Rampenfläche hinausragen. Mit der Funktion *Ausschneiden* können diese überstehenden Teile entfernt werden.

6.3.2. Wasserspezifische Anlagen

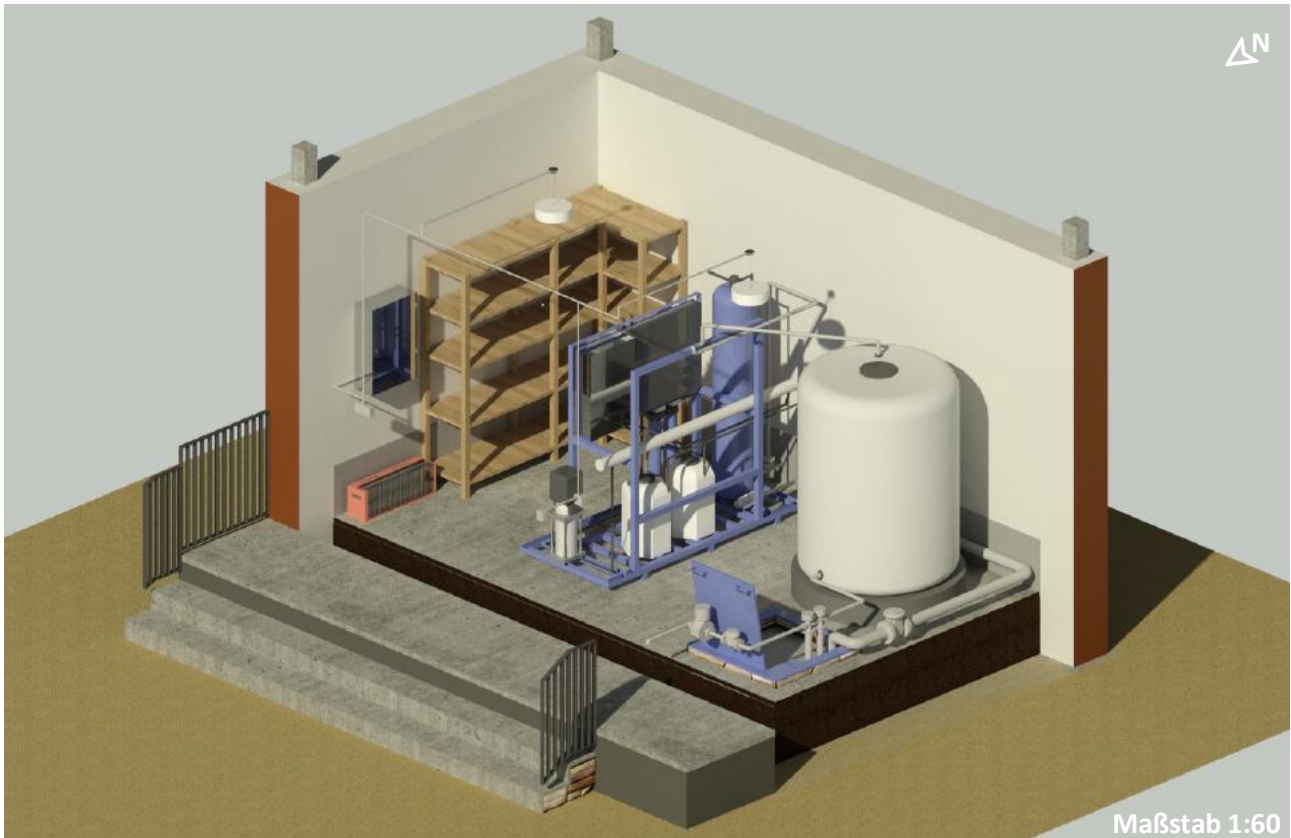


Abbildung 82: 3D-Schnitt des Gebäudes der Wasseraufbereitung (eigene Darstellung)

Im Rahmen dieses Kapitels wird die Modellierung der Bauteile erläutert, welche im Zuge der Wasserversorgung in dem Gebäude implementiert sind. Darunter fallen primär das Bedienterminal, der Trinkwasserbehälter sowie die Umkehrosmoseanlage. Alle drei Anlagenteile werden in Fusion 360 erstellt und anschließend in das Modell in Revit importiert.

Bedienterminal

Für das Bauteil wird zunächst ein Rahmen erstellt. Dieser basiert auf rechteckigen Grundflächen, die mit Hilfe der Funktion *Extrusion* zu Volumenkörpern umgewandelt werden. Die Bedienfläche an sich hat eine Tiefe von 25 cm. Mittig darin wird eine Auflagefläche für die Karte⁸ installiert, welche zum Bezahlen dient. Das Feld misst 9 cm mal 6 cm. Dies entspricht in etwa der Größe einer Bankkarte. Analog wird das Schild sowie das digitale Anzeigefeld modelliert. Für die Bedienungsknöpfe liegt eine kreisförmige *Skizze* zugrunde, welche über die Funktion *Anordnung auf Pfad* vervielfältigt werden.

Über die Knöpfe kann u. a. die genaue Literanzahl eingegeben werden. An der Unterseite des inneren Rahmens ist zudem ein Lautsprecher integriert. Dieser ist als *Zylinder* modelliert. Die auditive Unterstützung ermöglicht allen Personen einen uneingeschränkten Zugang zum Trinkwasser und gestaltet den Prozess einfach nachzuvollziehen. Insbesondere aufgrund der hohen Analphabetenrate in der ländlichen Region stellt diese Funktion eine einfache und sinnvolle Unterstützung dar. Auf der Rückseite des Bedienterminals wird zudem eine Tür eingefügt. Hierfür wird ein *Gelenk* erstellt, welches sich um 120° öffnen lässt. Im Modell wird dieses jedoch im geschlossenen Zustand gezeigt.



Abbildung 83: Vergleich des Bedienterminals von Hesar und des Modells (eigene Aufnahme)

Trinkwasserbehälter

Der Wasserbehälter, wie in Abbildung 82 zu sehen, fasst ein Volumen von 2.000 Litern. Der Speicher wird nach der Aufbereitungsanlage in Hesar dimensioniert. Dieser besitzt eine runde Grundfläche und einen Außendurchmesser von 1,3 m. Die äußere Höhe des Tanks beläuft sich auf ca. 1,7 m. Mit Hilfe eines *Hohlzylinders* wird der Behälter modelliert. Die Form des Deckels wird dabei mit der Funktion *Abrunden* angepasst. Im Inneren wird ein *Vollzylinder* eingefügt, welcher das Wasser und deren Last veranschaulicht. Der Tank umfasst zudem drei *Öffnungen*. Eine davon ist der Deckel zur Wartung und Inspektion mit DN 300. Zudem verfügt der Behälter über einen Zu- und einen Ablauf, die beide mit DN 50 visualisiert werden. Durch die Platzierung an der Oberseite und am unteren Rand des Behälters ergeben sich keine Totwasserzonen und das Wasser zirkuliert problemlos. Des Weiteren ist darauf zu achten, dass das Material nach den DVGW-Richtlinien trinkwassergeeignet ist.

Außerdem wird ein Traktorreifen unter den Behälter gelegt, um einen höheren geodätischen Druck zu generieren, sodass keine Pumpe zwischen Trinkwasserbehälter und Zapfstelle notwendig ist. Außerdem erhöht diese Maßnahme die Fließgeschwindigkeiten und in dessen Folge reduziert sich die Abfüllzeit. Der Reifen misst eine Höhe von 25 cm und einer Auflagefläche von 50 cm. Der Durchmesser des Traktorreifens beträgt 1,4 m, sodass der Behälter nicht verrutscht. Um ein realistischeres Abbild zu schaffen, werden die äußeren Kanten des Bauteils abgerundet.

⁸ Die Prepaid-Karten können derzeit in einem Geschäft in Hesar aufgeladen werden, da das Dorf über dieselbe Zahlungsart bei der Bereitstellung von Trinkwasser verfügt. Zukünftig ist es denkbar, dass auch in Hamzehloo selbst die Karten aufgeladen werden können, beispielsweise im Besucherzentrum. Auf die Karte können maximal 25.000 Toman geladen werden. Dies entspricht einer Menge von 1.000 Liter Trinkwasser.

Umkehrosmoseanlage



Abbildung 84: Vergleich der Umkehrosmoseanlage in der Fabrik mit dem digitalen Modell (eigene Aufnahme)

Die Wasseraufbereitungsanlage wird anhand von Aufnahmen aus den Kampagnen vor Ort in Fusion modelliert. Das **Grundgerüst** basiert aus einzelnen *Stahlquadrern*, die kombiniert werden, sodass im Nachhinein die weiteren Anlagenkomponenten besser eingefügt werden können. Der kombinierte **Sand-Aktivkohle-Filter** wird als *Vollzylinder* modelliert, wobei beide Enden abgerundet sind. Das an der Oberseite angebrachte 6-Wege-Ventil wird ebenfalls als *Zylinder* dargestellt. Um den **Antiscalent-Behälter** zu visualisieren, wird zunächst ein *Polygon* skizziert und anschließend extrudiert. Erneut wird die obere Mantelfläche mit der Funktion *Abrunden* angepasst. Zudem wird ein Deckel aus Kunststoff hinzugefügt. Weil der **CIP-Behälter** baugleich ist, können die Elemente kopiert werden. Die **Membranen** befinden sich in einer Hülle, die als *Vollzylinder* modelliert wird. Dieser ist 2,2 m lang und besitzt einen Durchmesser von 10 cm. Die Hülle beinhaltet zwei Membranen á 1 m Länge. Das Element wird oberhalb der Behälter auf den zwei stützenden Querstreben positioniert.

Die **Eingangspumpe** wird mit Hilfe von *Zylindern* und einem *Quader* erstellt, die kombiniert und deren Kanten abgerundet werden. Laut Herstellerangaben muss der Druck vor der Anlage allerdings 1 bar betragen. Aufgrund des geodätischen Drucks liegt dieser bei ca. 3 bar. Weil dieser zu hoch für die Anlage ist, bedarf es ein Druckminderungsventil. Ob jedoch beide Bauteile notwendig sind, muss final geklärt werden. Auf jeden Fall bedarf es einer **Hochdruckpumpe**. Diese generiert mindestens 16 bar. Die Modellierung besteht dabei aus mehreren Elementen. Als Standfläche wird ein 3 cm dicker *Quader* erstellt. Darauf steht ein *Vollzylinder* mit einem Durchmesser von 17,5 cm als Pumpengehäuse. Für den Schutz der Pumpe wird die untere Standfläche dupliziert und mit Streben verbunden. Ein weiterer *Quader* stellt das Motorengehäuse dar, wobei die Kanten erneut abzurunden sind. Für eine anschaulichere Visualisierung werden zudem unterschiedliche Materialien verwendet.

Um die **Dosiereinheit** zu modellieren, muss zunächst eine Befestigungsplatte erstellt werden. Diese ist 10 cm tief und in den Rahmen eingepasst. Linker Hand befinden sich zwei Manometer, die den Druck von CIP und Antiscalent anzeigen, wodurch eine Kontrolle der Systeme möglich ist. Modelliert werden die beiden Instrumente über zwei helle *Vollzylinder*. Die Dosierpumpe an sich besteht aus drei einzelnen Elementen. Der quaderförmige Motorblock bildet die Grundlage und wird mit einem

zylindrischen Übergang sowie einer Befestigung für die Schläuche vervollständigt. Aus ästhetischen Gründen werden die Kanten abgerundet.

Die **Anlagentechnik** befindet sich in einem kleinen Schaltschrank. Das Gehäuse ist insgesamt 25 cm tief und passt sich mit der Form direkt an die 75 cm mal 50 cm große Öffnung an. Neben der schwarz eingefärbten Fläche wird zudem eine LED-Anzeige im oberen Bereich eingefügt. Außerdem verfügt die Steuerungseinheit über mehrere Schalter und Knöpfe, die mit Hilfe von *Vollzylindern* visualisiert werden. Ein Schalter muss manuell erstellt werden. Die anderen vier baugleichen Komponenten werden mit Hilfe der Funktion *Anordnung auf Pfad* erstellt. Mit Hilfe eines *Schiebreglers* lässt sich der Abstand an die Bedingungen anpassen und so einstellen, bis das beste Ergebnis erzielt wird. Für die weiteren Reihen an Knöpfen werden die bereits erstellten Elemente der untersten Reihe kopiert und oberhalb eingefügt. Die einzelnen Komponenten werden farblich individuell nach den realen Bedingungen der Anlage dargestellt. Um den Schrank öffnen zu können, wird zudem linker Hand ein Griff eingefügt. Auf ein *Gelenk*, um die Tür öffnen zu können, wird bei der Modellierung verzichtet, da das Bauteil in Revit nicht im geöffneten Zustand gezeigt werden soll.

Ein weiterer Part der Anlage stellen die **Vorfilter** dar. Diese sind in Reihe geschaltet, weil sie mit 5 μm und 1 μm über einen unterschiedlichen Porendurchmesser verfügen. Über die Funktion *Linie* kann die gewünschte Grundfläche für die Halterung skizziert werden. Der Filter besteht aus einem Deckel, der fest mit der Konstruktion verschraubt ist. Das Filtergehäuse, hier als *Zylinder* modelliert, schließt daran an und besitzt einen etwas geringeren Durchmesser. Der eigentliche Filter ist im Inneren geschützt verbaut und im Modell nicht extra visualisiert. Die Länge des Filters beträgt ca. 50 cm. Die erstellten Bauteile können dupliziert werden, da sich die äußeren Bestandteile nicht unterscheiden, sondern lediglich der innere Filter.

Weiterhin werden die **Rohrleitungen** ins Modell übertragen. Dabei ist zwischen den Hochdruckleitungen und den Rohren mit dem normalen Betriebsdruck zu unterscheiden. Die Leitungen, an denen Hochdruck anliegt, bestehen aus Stahl, während die Leitungen bei geringeren Druckverhältnissen aus PVC bestehen. In Fusion 360 werden die Rohre mit DN 25 mittels *Hohlzylinder* erstellt. Dabei wird ein Teilstück modelliert, während die weiteren Rohrleitungsabschnitte jeweils kopiert und durch *Drehen/Verschieben* richtig positioniert werden. Mit der Funktion *Drücken/Ziehen* kann die Länge der Rohre individuell angepasst werden. Auf diese Weise werden die wichtigsten Bauteile der Anlage miteinander verbunden, wobei nicht auf Vollständigkeit geachtet wird. Stattdessen liegt der Fokus auf der verständlichen Visualisierung der Aufbereitungsanlage. Insbesondere kleinere Leitungen, wie beispielsweise der PVC-Schlauch zwischen der Dosiereinheit und dem CIP-Behälter, werden nicht mit in das Modell aufgenommen, weil die Fülle an Details verwirrend wirkt. Dagegen werden alle Hauptleitungen vollständig dargestellt. Dazu zählen der Zulauf des unbehandelten Grundwassers, der Zu- und Ablauf der Rückspülung des Sand-Aktivkohlefilters, der Membran sowie der Mikrofilter, die Anbindung der Hochdruckpumpe und der beiden Kunststoffbehälter. Außerdem wird die Verbindung zum Trinkwasserbehälter modelliert.

Neben den PVC-Schlauchverbindungen erfolgt zudem keine Darstellung der Stromkabel. Auch werden nicht alle Ventile, Manometer und Flanschverbindungen im Detail visualisiert.

6.3.3. Innenausstattung

Das Gebäude soll neben der Anlagentechnik auch als Lager für die bereits erworbenen Ersatzmaterialien dienen. Aufgrund der Menge und Lagerfähigkeit der Chemikalie wird Antiscalent für ein Jahr im Voraus gekauft. Die Mikrofilter werden dagegen für sechs Jahre gekauft. Für dieselbe Zeitspanne wird auch der Sand und die Aktivkohle erworben. Dies ermöglicht einen Filterwechsel ohne Zeitverzögerung. Die Säcke mit diesem Material müssen allerdings auf einer Palette oder im **Regal** so gelagert

werden, dass sie gegen Feuchtigkeit geschützt sind. Aufgrund der geringen Grundfläche wird ein Regal, wie in Abbildung 82 zu sehen, in dem Gebäude eingepplant.

Die Modellierung erfolgt mit Hilfe von Fusion 360. Mit Hilfe der Funktion Linie wird eine L-förmige *Skizze* angefertigt. Die kurze Seite misst einen Meter, die lange Seite zwei. Die Ablagefläche beläuft sich auf 50 cm. Diese Fläche wird mit Hilfe der *Extrusion* zu einem 3 cm dicken Körper umgewandelt. Die Stützen des Regals bestehen aus einer quadratischen Grundfläche mit einer Seitenlänge von 5 cm. Die Gesamthöhe beträgt zwei Meter. Die Stützen werden in allen Ecken sowie in der Mitte der langen Seite eingefügt. In Summe werden fünf Ablageflächen erstellt. Um einen Schutz gegen Feuchtigkeit zu gewährleisten ist das unterste Fach 15 cm oberhalb des Fußbodens installiert. Die beiden unteren Fächer besitzen eine Höhe von 50 cm, die beiden oberen ca. 40 cm. Auf der obersten Ablagefläche können bei Bedarf weitere Utensilien gelagert werden. Um die Kippgefahr zu vermeiden und die Sicherheit der Personen im Gebäude sicherzustellen, soll das Regal in der Wand verschraubt werden. Das Material des Regals muss ausreichend stabil sein, um z. B. die Säcke mit Aktivkohle und Sand über längere Zeiträume zu lagern. Darüber hinaus soll das Material kostengünstig und lokal verfügbar sein. Für das Modell wird Holz als natürliches Material gewählt. Eine Ausführung in Stahl o. Ä. ist jedoch genauso denkbar. Das Regal wird in der nordöstlichen Ecke des Bauwerks platziert, da dort keine Wasserleitungen an den Wänden verlaufen und so ausreichend Bewegungsfreiheit vor der Aufbereitungsanlage für Wartungs- und Inspektionsarbeiten, Filterwechsel sowie Kontrollen gewährleistet ist.

6.3.4. Technische Gebäudeausrüstung

Rohrleitungen

Die Wasserleitungen des betrachteten Gebäudes gliedern sich in drei verschiedene Bereiche. Zum einen liegt der Zufluss des Brauchwassers vor, zum anderen der Abfluss in Form von Trinkwasser. Außerdem müssen die in Kapitel 2.3 erläuterten Rückspülströme als Abwasser abgeleitet werden.

Um die Leitungen in den Schacht einzuführen, müssen Öffnungen in die Wand geschnitten werden. Da diese kreisförmig sein sollen, werden diese mit der Funktion *Profil bearbeiten* in Revit eingefügt, indem die entsprechende Wand ausgewählt wird. Der **Zufluss** des Brauchwassers muss von DN 75 auf DN 25 reduziert werden, weil die Rohre der Aufbereitungsanlage mit diesem Durchmesser geliefert werden. Um die Leitung zu entlasten und den Übergang fließender zu gestalten, wird in das Netz zudem ein Teilstück mit DN 50 implementiert. Die Rohre werden wie zuvor bereits erläutert eingefügt und mit Rohrformteilen, vornehmlich 90°-Bögen, verbunden. Die Rohrleitung des Zuflusses verläuft dabei auf Eintrittshöhe der Aufbereitungsanlage an der Wand entlang.

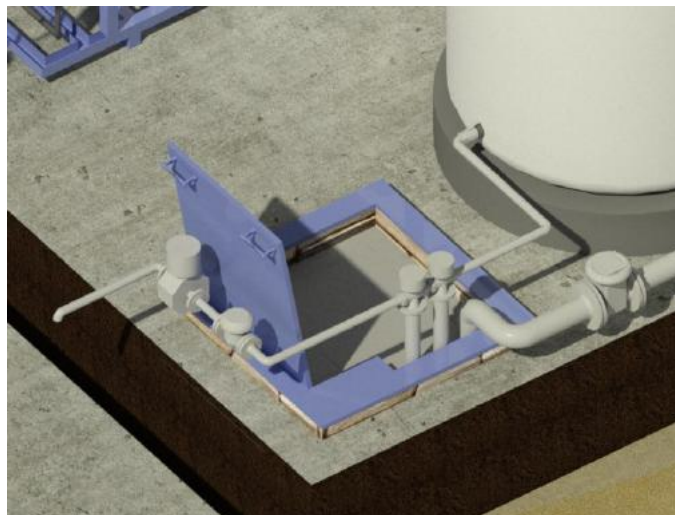


Abbildung 85: Detailausschnitt der Rohrleitungen und Armaturen bei der Wasseraufbereitung (eigene Darstellung)

Die Leitungen des **Trinkwassers**, die alle als Rohre mit DN 25 oder DN 50 verbaut werden, umfassen auch die Verbindung zwischen Aufbereitungsanlage und Trinkwasserbehälter. Das PE-Rohr wird auf direktem Weg zwischen den beiden Bauteilen verlegt. Am Ausgang des Wassertanks schließt erneut ein Rohr mit DN 25 an, welches zur **Zapfstelle** führt (siehe Abbildung 85). Dabei muss die Leitung so verlegt werden, dass die Luke des Schachtes problemlos geöffnet werden kann. Die Zapfstelle liegt rechts neben dem Bedienterminal, da linker Hand eine potenzielle Kollisionsgefahr mit der offenen Tür besteht. Das Rohr muss durch die Außenwand geführt werden, wobei dies wie beim Schacht mit einer kreisförmigen *Öffnung* geschieht. Außen wird zudem ein 90°-Bogen angebracht, damit das Wasser besser fließen kann. Für eine leichtere Bedienung und bessere Befüllung aller Gefäße bietet es sich zudem an, am Ende des Rohres ein flexibles Stück PVC-Schlauch zu montieren.

Neben der **Trinkwasserleitung** zur direkten Entnahme gibt es noch die beiden Rohrleitungen, welche das Trinkwasser zum Besucherzentrum und zur Ausgrabungsstätte leiten. Beide Leitungen werden mit PE-Rohren in DN 50 ausgeführt, weshalb ein *Übergang* in Revit eingefügt wird.

Der Abfluss des **Abwassers** besteht aus den Volumenströmen des Konzentrats sowie des anfallenden Rückspülwassers des Sand-Aktivkohle-Filters. Vorerst wird der Ablauf, wie im Dorf generell üblich, oberirdisch abgeleitet. Wenn in Zukunft eine Aufbereitung des Konzentrats umgesetzt wird, kann der bereits eingeplante Anschluss im Schacht dafür genutzt werden. Im Modell werden die beiden Abwasserströme am Rande der Aufbereitungsanlage zusammengeführt. Anschließend wird das Rohr an der Rückseite auf Höhe der Aufbereitungsanlage durch die Wand geführt und entlang der Außenwände oberirdisch in Richtung Straße verlegt. Dabei ist ein durchgehendes Gefälle der Leitung zu berücksichtigen.

Armaturen

Für den reibungslosen, automatisierten Betrieb benötigt es einige Armaturen, welche im Folgenden von der Zapfstelle aus entlang der Leitungen erläutert werden.

In unmittelbarer Nähe der Zapfstelle muss ein **Regelventil** installiert werden. In Revit wird dies in Form eines *Induktiv-Durchfluss-Messgerät* visualisiert. Dieses elektronische Ventil ist mit dem Bedienterminal verbunden und gibt die gewünschte Wassermenge frei. Das Ventil muss demnach über eine „Auf/Zu“-Funktion verfügen, beispielsweise über einen Kugelhahn oder Schieber. Der genaue Durchfluss wird anhand eines vorgeschalteten **Wasserzählers** ermittelt. Dieser wird im *Eigenschaftenmenü* auf einen geringeren Durchmesser reduziert und die Maße entsprechend angepasst. Das elektronische Regelventil ermöglicht somit einen automatisierten Betrieb der Anlage ohne großen Personalaufwand und -einsatz.

Beim Aufteilen des Trinkwasserstroms zur Abgabestelle und den Leitungen zur Ausgrabungsstätte bzw. des Besucherzentrums kommen zwei sog. **3-Wege-Ventile** zum Einsatz. Die Maße werden erneut im Menü angepasst. Die Ventile müssen so schaltbar sein, dass beide Abzweige geschlossen werden können. Denn das Besucherzentrum ist bisher nicht aktiv und zur Ausgrabungsstätte ist kein dauerhafter Zufluss gewünscht, sondern nur während der Perioden, in denen Arbeitskräfte im Rahmen von Grabungskampagnen vor Ort sind⁹.

Außerdem ist am Ausgang des Trinkwasserbehälters ein **Absperrschieber** zu installieren. In diesem Fall wird dieser als *Kugelhahn* modelliert. Dies ermöglicht eine Wartung oder Reparatur der nachfolgenden Leitungen und Armaturen. Ein weiterer Absperrschieber befindet sich am Ausgang der

⁹ Um eine Kontrolle der Abgaben in Richtung Besucherzentrum und Ausgrabungsstätte zu gewährleisten, sollten an beiden Standorten Wasserzähler oder ggf. ein Bedienterminal eingerichtet werden, damit anfallende Kosten für den Wasserverbrauch berechnet werden können. Nur so kann die Trinkwasserabgabe im Sinne der Gerechtigkeit durchgeführt und die zukünftige Finanzierung sichergestellt werden.

Membran, wobei dieser fest in der Aufbereitungsanlage verbaut ist. Dieser stoppt im Bedarfsfall den Zufluss, wodurch eine Wartung des Trinkwassertanks möglich ist.

Vor dem Eintritt in die Umkehrosmoseanlage muss laut Herstellerangaben ein **Druckminderungsventil** integriert werden. Begründet wird dies mit dem zu hohen Eingangsdruck, der sich infolge der Höhendifferenz zwischen Reservoir und Aufbereitungsanlage auf 3 bar beläuft. Des Weiteren wird, wie in Abbildung 85 zu sehen, ein **Absperrschieber** an der Zuleitung des Brauchwassers installiert. Dies gewährt eine Reparatur, Wartung oder Montagearbeiten an der Anlage. Eine Entleerung soll dagegen im nahegelegenen Sammelschacht durchgeführt werden.

Im Rahmen der Rückspül- bzw. Abwasserleitungen wird ein **3-Wege-Ventil** implementiert, um die Abwasserströme des Konzentrats und des Filters zu steuern. Für die oberirdisch verlaufende Rohrleitung sollte zudem eine **Froschklappe** am Ende der Leitung installiert werden, um das Eindringen von Ungeziefer oder Schmutz zu verhindern.

Elektrokomponenten

Ein **Verteilerkasten** übernimmt die Funktionen des Schaltschranks. Dabei ist das Bauteil ähnlich aufgebaut, jedoch in kleinerer Ausführung. Der Verteilerkasten ist 50 cm breit, 75 cm hoch und 20 cm tief und wird direkt an der Wand befestigt.

Die elektrische **Notheizung** wird als komplettes Bauteil übernommen. Bei der Ausführung ist auf den Abstand zur Wand zu achten. Notwendig wird der Heizkörper wegen der Wasserleitungen und einiger Elemente der Aufbereitungsanlage, die empfindlich auf Frost reagieren und Schäden entstehen können.

Für eine ausreichende **Beleuchtung** bedarf es sowohl innen als auch außen künstliches Licht. Obwohl natürliches Licht durch das Fenster scheint, muss eine Wartung oder Reparatur zu jeder Tages- und Jahreszeit möglich sein. Die Außenbeleuchtung ermöglicht es den Bewohnern, auch in den Morgen- und Abendstunden Trinkwasser zu besorgen. Im Inneren werden deshalb zwei runde *Pendelleuchten* mittig zwischen Regal und Anlage sowie zwischen Anlage und Trinkwasserbehälter installiert. Im Außenbereich werden zwei runde *Deckenleuchten*, deren Radius auf 10 cm verkleinert wird, unter dem Vordach verbaut. Diese Positionierung der Lampen leuchtet den Bereich vor dem Gebäude deutlich besser aus, als wenn die Beleuchtung an der Wand angebracht wird.

Sowohl die **Lichtschalter** als auch die **Steckdosen** sind Aufputz verlegt. Im Innenraum befinden sich zwei Steckdosen, um die Heizung sowie andere technische Geräte wie z. B. eine Pumpe zum Absaugen anzuschließen. Diese werden auf einer Installationshöhe von 1,05 m angebracht und nicht auf 0,30 m, weil dort die Wandfliesen verlegt sind und die Gefahr von Spritzwasser höher ist. Bei den Lichtschaltern ist jeweils einer innen und außen installiert. Denn es soll den Menschen, die Trinkwasser kaufen, möglich sein, die Lichter im Außenbereich selbst einzuschalten, um das Bedienterminal sowie die Zapfstelle besser zu sehen.

Die Visualisierung der **Stromleitungen** erfolgt aus bekannten Gründen mit Leerrohren. Dabei werden die Lampen mit den Lichtschaltern sowie dem Verteilerkasten verbunden. Gemäß DIN 18015-1 werden die Leitungen 15 cm unterhalb des Daches zusammengeführt. Um die außenliegenden Elektrokomponenten anzuschließen, muss das Stromkabel durch die Wand geführt werden. Insbesondere beim Bedienterminal sowie der Aufbereitungsanlage ist darauf zu achten, dass wenn möglich die Querung von Strom- und Wasserleitungen vermieden wird. In der Steuereinheit der Aufbereitungsanlage sind bereits die wichtigsten Komponenten miteinander verbunden. Auch der Schwimmer im Trinkwasserbehälter kommuniziert direkt mit der Anlage. Es benötigt lediglich die Verbindung an das Stromnetz. Damit das Modell übersichtlich bleibt, wird diese Verbindung allerdings nicht extra ins Modell aufgenommen.

Darüber hinaus bedarf es einer **Anschlussleitung** zwischen dem Verteilerkasten und dem Strommast. Letzterer befindet sich in unmittelbarer Nähe zum Standort. Die Anschlussleitung soll direkt durch die Wand geführt werden und entlang der Außenwände an der Gebäuderückseite verlaufen. Aus technischen Gründen ist eine frostsichere Verlegung vorgeschrieben. Ob gerade für diese kurze Wegstrecke die Kabel in 80 cm Tiefe verlegt werden, ist unrealistisch. Vor allem, wenn die Tatsache beachtet wird, dass die erdverlegten Stromkabel im Dorf üblicherweise in 10 cm Tiefe verlegt werden. Deshalb soll bei diesem Gebäude eine Alternative aufgezeigt werden. Für die Verlegung können sog. NYY-Kabel eingesetzt werden. Diese werden z. B. auch für die Verlegung an Außenwänden empfohlen (DIN EN 50565-1).

6.3.5. Topografie

An diesem Standort liegen keine besonderen topografischen Verhältnisse vor. Zur besseren Veranschaulichung des Eingangsbereiches wird eine ebenerdige Oberfläche dargestellt. Dafür werden im Grundriss Nullpunkte platziert. Das Material entspricht dem des Reservoirs, da auch im Dorf eine Mischung aus hellen Lockergesteinen vorliegt.

6.4. Transport- und Verteilnetz

In diesem Kapitel liegt der Fokus auf der Trasse der Wasserleitungen. Das Netz verbindet die modellierten Gebäude miteinander, wobei die Straßenquerung und der Sammelschacht als kritische Stellen detaillierter erläutert werden.

6.4.1. Trassenverlauf

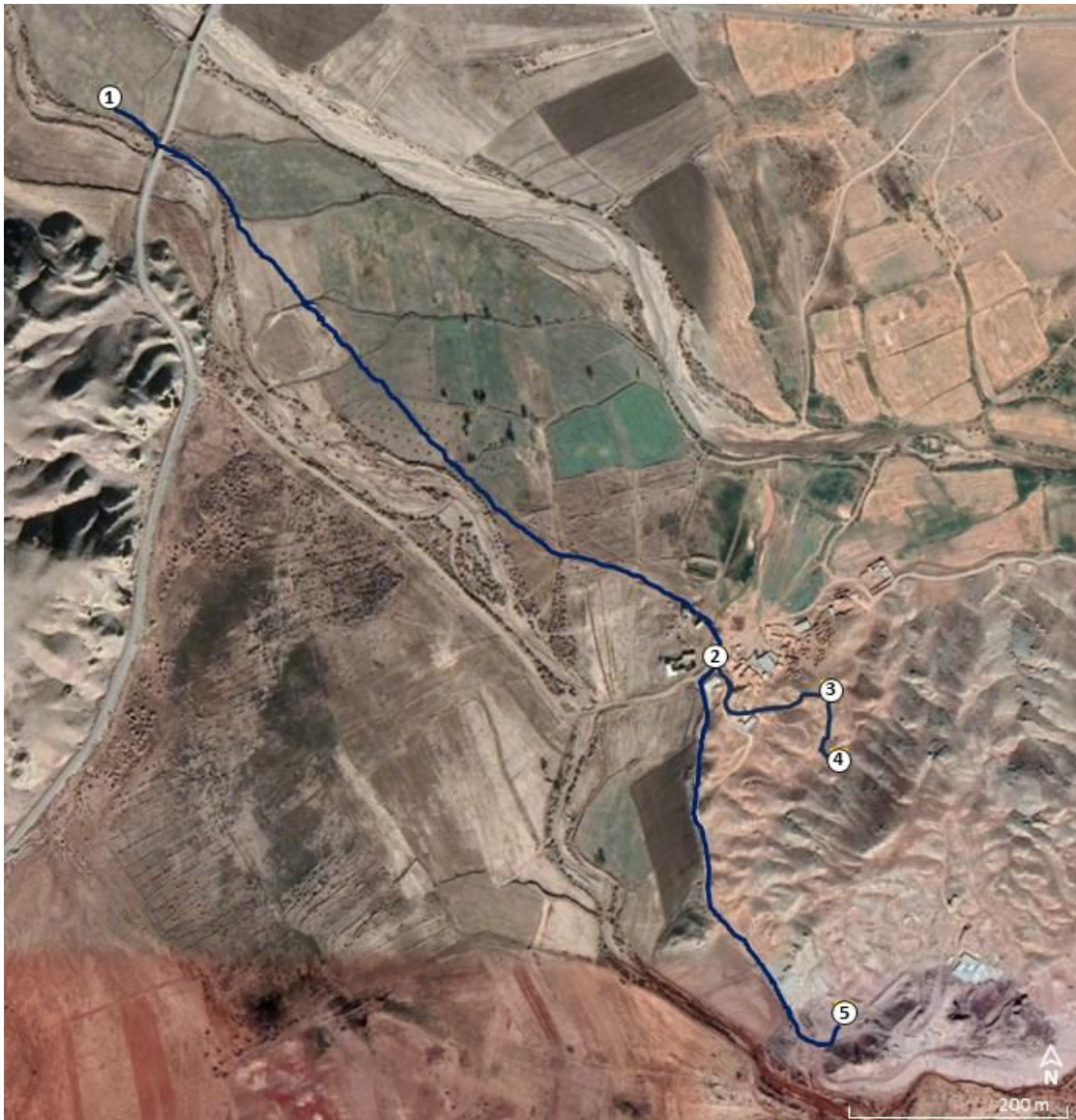


Abbildung 86: Verlauf der Trassen (eigene Darstellung mit Daten aus Google Earth 2021)

Die Hauptleitung beginnt beim Brunnenhaus (1) und endet am Reservoir (4). Von dort werden die Brauchwasserleitungen zum Besucherzentrum (3), zum Gebäude der Aufbereitungsanlage (2) sowie zur Ausgrabungsstätte (5) geführt. Von der Aufbereitungsanlage werden wiederum Leitungen mit Trinkwasser zur Ausgrabungsstätte, zum Besucherzentrum sowie zur direkten Entnahmestelle am Gebäude selbst verlegt. Dabei bildet der Sammelschacht in der Nähe der Aufbereitung einen zentralen Knotenpunkt.

Dimensionierung

Für den Bau der Trassen müssen die Rohrleitungen dimensioniert werden. Die Berechnungen basieren auf dem prognostizierten Wasserbedarf und sind der Arbeit von Eichhorn (2020) zu entnehmen. Aufgrund der lokalen Verfügbarkeit kommen Rohre mit DN 75 für die Brauchwasserleitung zwischen Brunnen, Reservoir und Aufbereitungsanlage zum Einsatz. Weil der mittlere Durchfluss insbesondere in den Trinkwasserleitungen geringer ausfällt, werden die restlichen Rohre im Netz mit einem Durchmesser von DN 50 umgesetzt. Ansonsten würde das Wasser in den Leitungen stagnieren. Tabelle 5 fasst die verschiedenen Trassen des Verteilnetzes zusammen.

Tabelle 5: Übersicht der Rohrleitungen im Verteilnetz (eigene Darstellung)

Strecke	Rohrdurchmesser	Art des Wassers
Brunnen – Reservoir	DN 75	Brauchwasser
Reservoir – Aufbereitung	DN 75	Brauchwasser
Reservoir – Besucherzentrum	DN 50	Brauchwasser
Reservoir – Ausgrabungsstätte	DN 50	Brauchwasser
Aufbereitung – Entnahmestelle	DN 25	Trinkwasser
Aufbereitung – Besucherzentrum	DN 50	Trinkwasser
Aufbereitung – Ausgrabungsstätte	DN 50	Trinkwasser

Rahmenbedingungen

Ergebnisse aus vorherigen Kampagnen führten zu dem Schluss, Polyethylen als **Material** für die Rohrleitungen zu verwenden. Vorteile dieses Werkstoffes sind u. a. die problemlose Nutzung der Rohre auch mit salzhaltigem Wasser, der niedrige Rohrreibungsverlust, wodurch geringe Druckverluste im Verteilnetz entstehen sowie der Flexibilität der Leitungen. Außerdem sind PE-Rohre in Iran weit verbreitet. Neben dem Material ist auch die **Tiefe** entscheidend, in der die Leitungen verlegt werden. Die Berechnung der Frosttiefe berücksichtigt dabei auch die lokalen Gegebenheiten und klimatischen Bedingungen. Eichhorn (2020) ermittelte eine Frosttiefe von ca. 0,9 m. Unter Beachtung ausreichender Sicherheitsfaktoren sollten die Leitungen dementsprechend in einer Tiefe von einem Meter verlegt werden. Auch die iranischen Bauunternehmer nehmen diesen Richtwert für den Bau der Trassen an. Weil die Trasse zwischen Brunnen und Dorf durch mehrere Ackerflächen verläuft, muss die Tiefe des Arbeitsbereiches während der Feldbewirtschaftung mit in die Überlegungen einbezogen werden. Allerdings belaufen sich die Furchen während der Feldarbeit auf maximal 50 cm, sodass in diesem Bereich keine Überschneidungen vorliegen.

Modellierung

Die Modellierung des Transport- und Verteilnetzes erfolgt mit Hilfe der Software InfraWorks. Dafür wird die Funktion *Rohrleitung* im Bereich *Erstellen* genutzt. Die Verlegung erfolgt anhand der Routen, die mit GPS-Daten hinterlegt sind. In InfraWorks müssen die Leitungen mit einer *linearen Darstellung* manuell eingefügt werden. In den Eigenschaften des Bauteils können wichtige Parameter ergänzt werden. Dies wird im Folgenden anhand des Beispiels der Brauchwasserleitung zwischen Brunnen und Reservoir erklärt. Als *Rohrmaterial* wird Polyethylen eingetragen. Der *Netzname* wird mit Wasserleitung benannt, um die Leitung von der Gastrasse abzugrenzen. Unter *Bezeichnung* erfolgt der Zusatz Brauchwasser, wodurch auch im Verteilnetz direkt zwischen Brauch- und Trinkwasserleitungen unterschieden werden kann. Außerdem ermöglicht das Programm, ein *Erstelldatum* zu hinterlegen. Dieses wird mit dem 06.03.2023 angegeben. Dieses ist insbesondere für die weitere Nutzung des Modells wichtig, da anhand dieser Daten die Lebensdauer der Rohre und Inspektionsintervalle ermittelt werden können. Des Weiteren erfolgt im Menü die Angabe des *Höhenversatzes*. Dieser soll bei -1,0 m liegen. Die *Größe X* sowie *Größe Y* geben den Rohrdurchmesser wieder. Aufgrund des Außendurchmessers der DN 75 Leitung werden diese Werte mit jeweils 0,08 m eingetragen. Die weiteren Leitungen sind gemäß den jeweiligen Bedingungen aus Tabelle 5 auszuführen.

Um eine Überschneidung der Leitungen im Bereich des Sammel-schachtes zu vermeiden, verläuft dort die Leitung kurzzeitig in einer Tiefe von 1,10 m. Die beiden querenden Wasserleitungen der Ausgrabungsstätte sind in diesem Abschnitt leicht angehoben. Der vertikale Abstand der Leitungen sollte mindestens 10 cm betragen, wobei stets die Frosttiefe berücksichtigt werden muss. Um die Leitungen voneinander zu trennen, kann auch ein Schutzrohr mit Abstandhalter installiert werden, um den direkten Kontakt zwischen den Wasserleitungen zu vermeiden. Da alle Rohrleitungen mit Kaltwasser gefüllt sind, bedarf es keiner Isolierschalung, weil keine thermische Beeinflussung vorliegt.

Zur besseren Übersicht werden die Leitungen in InfraWorks in einem größeren Abstand zueinander verlegt. In Realität liegt dieser Abstand bei 20 cm (DVGW W 400-1), weil die Rohrleitungen in einem gemeinsamen Graben verlegt werden.

6.4.2. Kritische Stellen im Verteilnetz

Aufgrund des Standortes des Brunnens bedarf es einer **Straßenquerung**. Weil der Asphalt nicht aufgebrochen werden darf, muss die Trasse unter der Erhöhung durchgeführt werden. Dazu wird, wie in Abbildung 87 zu sehen, ein Tunnel gegraben, in dem die Leitungen verlegt werden.

Insbesondere bei den **Übergabestellen** ist auf die entsprechende Verlegetiefe zu achten. Denn diese schützt das transportierte Brauch- bzw. Trinkwasser vor Frost und Hitzeeinwirkungen. Deshalb muss gegebenenfalls im Übergangsbereich eine Rohrdämmung eingefügt werden. Dafür bietet sich zum Beispiel eine Kautschuk-Dämmung an. In InfraWorks müssen die Rohrleitungen der Trasse mit den Anschlüssen der Gebäude, welche in Revit im Ansatz modelliert wurden, verbunden werden. Abbildung 88 stellt einen Ausschnitt des unterirdischen Rohrleitungsnetzes dar. Im Hintergrund verläuft die Gasleitung (gelbes Rohr) sowie die Hauptleitung, welche den Brunnen mit dem Reservoir verbindet.



Abbildung 87: Querung der Straße
(Aufnahme: H. Zifar)

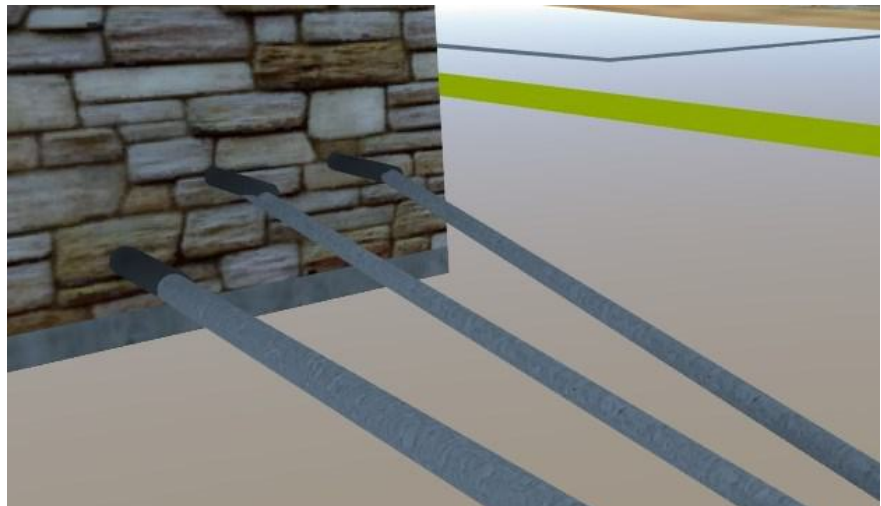


Abbildung 88: Anbindung der Leitungen in InfraWorks (eigene Darstellung)

Sammelschacht

Um die Wartung und den Betrieb der Trink- und Brauchwasserleitungen zu vereinfachen, bündelt der Sammelschacht alle Leitungen in zentraler Lage. Für eine detailliertere Modellierung wird der Schacht inklusive der Leitungen und Armaturen in Revit konstruiert.

Die tragende *Wand* wird aus Naturstein konstruiert, um den Erddruck standzuhalten. Eine 10 cm dicke *Bodenplatte* aus Ortbeton grenzt das Bauwerk nach unten ab. Wie in Abbildung 89 dargestellt, befindet sich die Oberkante des Sammelschachts etwa 10 cm über der Geländeoberkante. Dies soll verhindern, dass Fahrzeuge auf den Schacht fahren, weil die Abdeckungen dafür nicht ausgelegt sind. Die Oberkante des Schachtes wird mittels einer *Geschossdecke* modelliert, die an den Außenwänden fixiert ist. Für den Schachteinstieg werden zwei *Luken* verwendet, die baugleich mit der des Brunnenhauses sind. Um die Geschossdecke zu schneiden und den Eingang zu visualisieren, bedarf es zweier *Öffnungen*, die in Revit eingefügt werden. Gegebenenfalls können Trittstufen an der Wand befestigt werden, damit ein gefahrloses Absteigen in den Schacht zu Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten gewährleistet ist.



Abbildung 89: Außenansicht des Sammelschachts (eigene Darstellung)

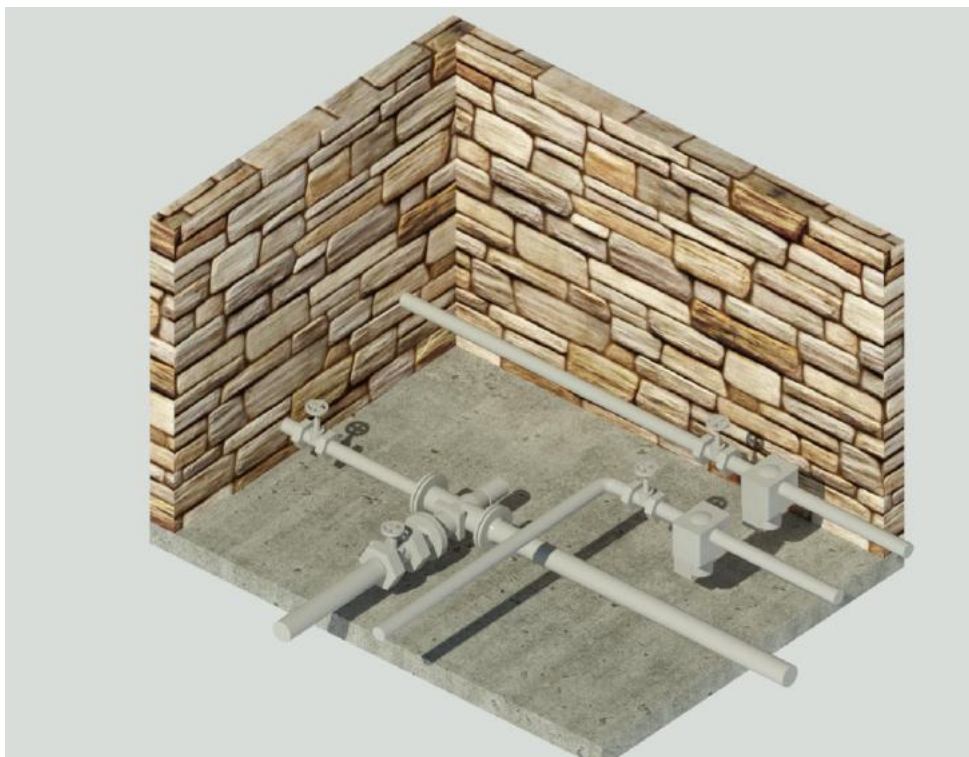


Abbildung 90: Innenansicht des Sammelschachts (eigene Darstellung)

Weil sich die Wasserleitungen kreuzen, müssen diese in unterschiedlichen Höhen in den Schacht geleitet werden. Der Zufluss des Brauchwassers aus dem Reservoir wird deshalb niedriger platziert als die Trinkwasserleitung, welche das Besucherzentrum versorgt.

Insgesamt vier **Entleerungsventile** ermöglichen es, das Wasser aus jedem Teilstrang abzulassen. Vor allem bei den Leitungen in Richtung Ausgrabungsstätte ist dies besonders wichtig, weil diese Trassen nur dann in Betrieb genommen werden, wenn eine Grabungskampagne stattfindet und sich Personal vor Ort befindet. Doch auch für Wartungsarbeiten oder Schadensfälle ist es sinnvoll, alle Leitungen

entleeren zu können. Der Schacht dient deshalb auch als Pumpensumpf. An der Brauchwasserleitung ist zudem ein **Mehrwegeventil** installiert. Dadurch kann das Brauchwasser auch in Zukunft an die Bewohner im Dorf verteilt werden, wenn sie dort ihre eigenen Leitungen anschließen. Außerdem werden im Sammelschacht bei den zwei Trinkwasserleitungen in Richtung Ausgrabungsstätte sowie zum Besucherzentrum zwei **Inline-Pumpen** eingeplant. Um die Höhendifferenz zu überwinden und ausreichend Wasserdruck an den Entnahmestellen zu generieren, müssen die Pumpen einen Druck von mindestens 4 bar erzeugen. Abhängig von dem Ende der Leitungen bei der Ausgrabungsstätte muss auch die Brauchwasserleitung mit einer zusätzlichen Inline-Pumpe ausgestattet werden. Basierend auf dem ursprünglichen Konzept reicht der geodätische Druck für den Transport aus. Sollte zukünftig die Entnahmestelle versetzt werden, kann die Pumpe nachträglich im Sammelschacht installiert werden. Denn für das Bauteil wird ausreichend Platz freigehalten.

6.5. Import der Gebäude von Revit in InfraWorks

Damit die erstellten Gebäude in InfraWorks übertragen werden können, müssen einige Schritte durchgeführt werden. Zunächst muss der *Projekt-Basispunkt* im Koordinatensystem auf die Koordinaten (0/0/0) gesetzt werden. Anschließend wird die 3D-Ansicht ausgewählt und nur diese als FBX-Datei exportiert. Daraufhin muss das Projekt in InfraWorks geöffnet werden und eine *Datenquelle* ausgewählt werden. Wenn die korrekte Datei aus der erscheinenden Drop-Down-Liste gewählt wird, muss diese zunächst konfiguriert werden. Als Typ muss *Gebäude* festgelegt werden. Außerdem sollte die interaktive Platzierung genutzt werden, weil hierbei die Modelle direkt im digitalen Geländemodell positioniert werden können. InfraWorks bietet zudem an, die exakten Koordinaten einzugeben, jedoch weichen diese von den aufgenommenen GPS-Daten ab, sodass dies zu keinem sinnvollen Ergebnis führt. Abschließend muss das Vorgehen gespeichert und das Projekt aktualisiert werden. Gegebenenfalls bedarf es einer Korrektur der Ausrichtung der Gebäude.

Es ist darauf hinzuweisen, dass benutzerdefinierte Texturen und Teile von erstellten Dateien nicht in das Programm importiert werden können. Das FBX-Format bietet hier allerdings die beste Lösung, da bei den zuvor angewendeten Object- oder DWG-Dateien ein hoher Datenverlust existiert. Für das optimale Ergebnis wird die in Revit erstellte Topografie bei dem Gebäude der Wasseraufbereitung sowie beim Besucherzentrum deaktiviert. Beim Brunnenhaus sowie beim Reservoir ist die eigens modellierte Topografie allerdings essenziell.

6.6. Visualisierung der digitalen Modelle mittels Kamerafahrten

Um die digitalen Ergebnisse allen Projektbeteiligten und den ausführenden Bauunternehmen auch in dynamischer Form zu präsentieren, bietet sich die Erstellung von Kamerafahrten durch die Modelle an. Sowohl in Revit als auch in InfraWorks erfolgt eine Visualisierung in Form von Videos.

6.6.1. Walkthrough in Revit

In Revit besteht die Erstellung sog. *Walkthroughs* aus zwei Teilschritten. Zunächst wird im Reiter *Ansicht* und der Drop-Down-Liste *3D-Ansicht* die Funktion *Walkthrough* ausgewählt. In einer Vogelperspektive, in diesem Fall der Grundriss des Erdgeschosses, wird per Mausklicks ein Pfad durch das Modell erstellt. Jeder Klick entspricht einem sog. *Schlüsselbild*. Die Höhe der Kamera kann durch die Option *Versatz* definiert werden. Diese soll sich auf Augenhöhe einer stehenden Person befinden, um das Ergebnis realistischer zu gestalten. Diese liegt gemäß DIN CEN ISO/TR 7250-2 bei durchschnittlich 1,60 m. Mit Beendigung des Pfades wird dieser im *Projektbrowser* hinzugefügt.

Im zweiten Schritt können die einzelnen Positionen und Blickrichtungen der *Schlüsselbilder* individuell bearbeitet werden. Für eine bessere Übersicht und einfachere Anpassung empfiehlt es sich, den Grundriss, eine Seitenansicht sowie den Walkthrough parallel auf einem geteilten Bildschirm zu

öffnen. In der Optionsleiste muss die *Aktive Kamera* eingestellt werden, um für jeden markierten Punkt neben der Blickrichtung auch die Blickweite festzulegen. Außerdem ermöglicht diese Funktion eine Anpassung der Höhe, sodass beispielsweise das Gebäude in Teilbereichen des Videos von oben betrachtet wird. Dazu muss das Steuerelement von *Aktive Kamera* auf *Pfad* geändert werden, wodurch sich die einzelnen Punkte in einer Seitenansicht manuell verschieben lassen. Damit es nicht so erscheint, dass der Blick über das Gebäude hinweg schweift, muss bei den erhöhten Punkten auch die Blickrichtung mit einem Neigungswinkel in den Seitenansichten versehen werden.

6.6.2. Drehbuch in InfraWorks

In InfraWorks befindet sich die entsprechende Funktion im Bereich *Präsentieren*. Während der Erstellung des Drehbuchs wird in einer Fußleiste ein Fenster angezeigt, in welchem die einzelnen Elemente übersichtlich dargestellt werden. In dem vorliegenden Fall ist eine individuelle Kameraführung gewünscht, weshalb eine *Kamerapfadanimation* Anwendung findet. Die Erstellung des Pfades erfolgt anhand der üblichen Navigation innerhalb des Programms. Dementsprechend wird an jedem relevanten Punkt ein sog. *Keyframe* im Modell hinzugefügt. Dieses erscheint in einer Spur in der Fußleiste. Um eine Animation zu erzeugen, müssen weitere Eigenschaften definiert werden. Zum einen soll die Blickrichtung der Kamera zwischen den festgelegten Punkten interpoliert werden, damit ein flüssiges Video entsteht. Zum anderen muss die Geschwindigkeit eingetragen werden, mit welcher sich die Kamera bewegt. Um eine bessere Übersicht zu garantieren, wird diese bei essenziellen Standorten im Modell reduziert. Im Gegensatz zur Geschwindigkeit wird sowohl die Höhe als auch die Blickrichtung der *Keyframes* manuell über die Navigation bestimmt. Abschließend wird das *Drehbuch*, welches einem Drohnenflug ähnelt, als Video exportiert.

Sowohl die in Revit visualisierten Walkthroughs des Brunnenhauses, des Reservoirs, des Gebäudes der Wasseraufbereitungsanlage sowie des Besucherzentrums als auch das in InfraWorks erstellte Drehbuch des gesamten Dorfes und dessen Umgebung sind als Videoformat in einer Zip-Datei in einem externen Anhang hinterlegt.

7. Zusammenfassung und Ausblick

Die Bestandsaufnahme der Kampagnen aus dem Jahre 2022 ergeben, dass im Vergleich zu 2019 nur wenige Änderungen hinsichtlich des ursprünglichen Konzepts vorliegen. Aus gesetzlichen Gründen musste der Standort des Gebäudes der Aufbereitungsanlage versetzt werden. Infolgedessen änderte sich auch der Verlauf der Trasse minimal. Jedoch wirkt sich diese Abweichung nicht negativ auf das Vorhaben aus, sondern trifft auf eine hohe Akzeptanz bei den Dorfbewohnern. Darüber hinaus wurde der Reza abaad Brunnen erfolgreich vertieft. Aufgrund technischer Schwierigkeiten stellte die Obere Wasserbehörde eine Bohrgenehmigung aus, sodass zukünftig eine langfristige und nachhaltige Versorgung Hamzehloos sowohl mit Brauch- als auch Trinkwasser gewährleistet ist. Eine weitere Abweichung vom ursprünglichen Konzept stellt der Rohrdurchmesser der Brauchwasserleitung dar. Auf dem lokalen Markt stehen PE-Rohre meist mit DN 75 und nicht mit DN 80 zur Verfügung. Deshalb werden diese in den Planungen übernommen, weil der verkleinerte Durchmesser keinerlei negative Beeinflussungen bezüglich der Berechnungsgrundlage des Leitungsnetzes mit sich bringt.

Grundsätzlich ist bei allen Bauwerken primär auf die lokale Bauweise zu setzen. Im Sinne der Nachhaltigkeit und langfristigen Nutzung der Wasserversorgungsinfrastruktur bedarf es einiger grundsätzlicher Maßnahmen, die beim Bau berücksichtigt werden müssen. Diese betreffen neben der Sicherheit der Bauten (z. B. Hochwasserschutzmaßnahmen) auch betriebliche Gründe (z. B. Dachluke oberhalb des Brunnens). Sofern es die iranischen Baubestimmungen und die lokalen Bautechniken zulassen, erfolgt hier die Umsetzung nach deutschen Standards. Dabei ist jedoch stets darauf zu achten, dass alle Projektbeteiligten über die Hintergründe informiert werden. Dies erhöht die Akzeptanz und schafft Verständnis für die Entscheidungsfindung, warum an manchen Stellen Abweichungen von der örtlichen Vorgehensweise Priorität haben. Des Weiteren stellt die Planung nach DIN-Norm sicher, dass die statischen Bedingungen bei den Bauwerken erfüllt sind. Die massiven Wände, Fundamente und Stahlträger können ausreichend Last aufnehmen. Genaue Berechnungen erfolgten im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht.

Gleichzeitig stellen die geplanten Gebäude eine Mischung aus traditioneller Bauweise und moderner Elemente dar. Dies verdeutlicht insbesondere das Besucherzentrum. Neben der typischen Lehmbauweise und dem Innenhof mit einem Wasserbecken umfasst das Gebäude eine Photovoltaikanlage zur regenerativen Energiegewinnung, blaue Infrastruktur zur Regenwassergewinnung sowie einer SBR-Abwasseranlage.

Die Auswirkungen des Klimawandels sind in der ländlichen Region Irans stark zu spüren. Seit einigen Jahren nimmt die Häufigkeit der Niederschlagsereignisse stetig ab, wodurch die Wasserentnahme zur Feldbewässerung steigt. Diese Kombination führt allerdings dazu, dass sich der Grundwasserspiegel nicht regeneriert, sondern immer weiter absinkt. Die Unterschiede zwischen einem regenreichen Jahr und einem trockenen Jahr zeigen die Pegelmessungen des Reza abaad Brunnens. Im Jahr 2019 betrug die Wassersäule ca. 1,90 m, während diese 2022 bei lediglich 20 cm lag. Als unmittelbare Konsequenz ergab sich die Brunnenvertiefung, um eine klimaresiliente Infrastruktur zu schaffen. Ein weiterer wichtiger Aspekt im Rahmen des Klimawandels stellt auch die Zunahme von Extremwetterereignissen dar. Im Untersuchungsgebiet liegt das Risiko eines Hochwassers vor. Dies betrifft in erster Linie das Brunnenhaus. Aufgrund dessen muss dieses mit baulichen Maßnahmen geschützt werden. Neben einem stromlinienförmigen Erdwall wird das Gebäude auch durch ein vertieftes Fundament gestützt. Weil das Eindringen von Wasser während eines Hochwassers trotz der baulichen Bemühungen nicht ausgeschlossen werden kann, wird der Brunnenkopf wasserdicht verschlossen. Dies bewirkt, dass kein potenziell kontaminiertes Oberflächenwasser in den Brunnen und in das Grundwasser eindringt und die Trinkwasserversorgung der Dorfbewohner gefährdet.

Für die Modellierung kommen in der Arbeit verschiedene Softwareanwendungen zum Einsatz. Jedes Programm wird für einen speziellen Anwendungsbereich verwendet. Die Modellierung der einzelnen Gebäude der Wasserversorgungsinfrastruktur findet in Revit statt. Für die Erstellung einzelner Bauteile, welche die lokale Verfügbarkeit und Gegebenheiten sowie die Ansprüche berücksichtigen, kommt Fusion 360 zum Einsatz. Die modellierten Elemente werden anschließend in das Gebäudemodell in Revit importiert. Bei InfraWorks liegt der Fokus auf der Modellierung des Dorfes und dessen Umgebung. Außerdem erfolgt in diesem Programm die Verlegung der Trasse. Um diese zu realisieren, werden die in Revit erstellten Bauten in InfraWorks importiert. Dementsprechend vereint das Modell in InfraWorks alle zuvor erstellten Komponenten.












Trotz der erfolgreichen Kampagnen im Jahr 2022, die den Baubeginn des Gebäudes der Wasseraufbereitung implizierten, fallen zukünftig weitere Baumaßnahmen an. Zunächst fordert allerdings die Obere Wasserbehörde einen erfolgreichen Pumpversuch am Reza abaad Brunnen. In naher Zukunft sind zudem das Reservoir sowie das Brunnenhaus fertigzustellen. Für diese Bauarbeiten werden die in dieser Arbeit erstellten Pläne und Videos den Projektbeteiligten zur Verfügung gestellt. Weiterhin müssen die Leitungen angeschlossen und eine Dichtheitsprüfung durchgeführt werden. Wenn die Anlage wie geplant funktioniert, besteht zudem die Möglichkeit, die Trinkwasserqualität durch die Obere Wasserbehörde bzw. das Labor kostenlos prüfen zu lassen. Auch ist die Planung und Vorbereitung des Baus des Besucherzentrums voranzutreiben. Im Zuge dessen soll auch die Kleinkläranlage installiert werden.















Neben den baulichen Maßnahmen bedarf es auch mehrere Schulungen. Für einige Arbeiten benötigt es nicht immer die Hilfe externer Fachkräfte, sondern sie können auch von den Dorfbewohnern eigenständig durchgeführt werden. Doch insbesondere die Funktionen und Wartungen des Brunnens, des Reservoirs und der Aufbereitungsanlage müssen den Bewohnern nähergebracht werden. Dabei sind ihnen auch die Wichtigkeit der einzelnen Anlagenkomponenten zu verdeutlichen. Dies soll verhindern, dass Anlagenteile, wie z. B. die Vorfilter, ausgebaut werden, um Kosten einzusparen. Denn diese Eingriffe erhöhen sogar die Kosten, weil dadurch die Lebensdauer der Membran reduziert wird. Im Zuge der Schulungen ist auch ein Wasserwart zu bestimmen, der für die Wartung der Infrastruktur verantwortlich ist. Dabei kann diese Aufgabe auch auf jüngere Personen übertragen werden.














Generell bietet das Projekt viele Chancen für das Dorf Hamzehloo und ihren Bewohnern. Denn die Realisierung einer modernen Wasserversorgungsinfrastruktur erhöht deren Lebensqualität enorm. Auch trägt das Vorhaben zur Zukunftssicherung des Dorfes bei. Denn die Wasserversorgung stellt die Basis für weitere strukturbildende Maßnahmen dar, die möglichst auch Entwicklungen im wirtschaftlichen und Bildungsbereich mit sich bringen sollen. Insbesondere das Besucherzentrum und der damit verbundene Tourismus schafft neue Arbeitsplätze in der Region. Gleichzeitig reduziert sich die Landflucht und die Wahrscheinlichkeit, dass das Dorf Hamzehloo auch in Zukunft erhalten bleibt, steigt. Dies führt wiederum dazu, dass die Kulturerbestätte auch zukünftig geschützt wird. Somit stellt eine erfolgreiche Projektumsetzung einen Gewinn für alle Beteiligten dar.






Glossar

1. Autodesk Revit

Symbol	Funktion	Beschreibung
Architektur		
	Bauteil	Platziert ein ausgewähltes Element im Gebäudemodell. Um den Elementtyp auszuwählen, ist eine Drop-Down-Liste zu verwenden. Anschließend in den Zeichenbereich klicken, um die Elemente im Modell zu platzieren.
	Fenster	Fügt Fenster zum Gebäudemodell hinzu. Mit Hilfe der Typenwahl kann die Art der Fenster angegeben werden oder eine Fensterfamilie in das Projekt geladen werden.
	Geländer	Erstellt ein Geländer, indem dessen Pfad eingegeben wird.
	Geschossdecke	Erstellt eine Geschossdecke für die aktuelle Ebene des Modells. Die Geschossdecke wird in Bezug auf die Ebene, auf der sie erstellt wurde, nach unten versetzt.
	Öffnung über Fläche	Erstellt eine Öffnung, die lotrecht zur ausgewählten Fläche eines Dachs, einer Geschossdecke oder einer Decke ist.
	Schachtoffnung	Erstellen einer vertikalen Öffnung, die mehrere Schichten überspannt und durch mehrere Dächer und Geschossdecken dazwischen geschnitten wird.
	Stütze	Fügt ein vertikales lasttragendes Element zum Gebäudemodell hinzu. Öffnen einer Draufsicht oder einer 3D-Ansicht, um die Tragwerksstützen manuell hinzuzufügen. Stützen können mit Trägern, Streben und Einzelfundamenten verbunden werden.
	Treppe	Fügt dem Gebäudemodell eine Treppe hinzu, wobei gemeinsame Treppenlaufs-, Podest- und Auflagerbauteile erstellt werden. Zum Einfügen muss eine Draufsicht oder 3D-Ansicht geöffnet werden. Die Auftrittsanzahl für einen Treppenlauf basiert auf dem Abstand zwischen den Geschossdecken und der maximalen Stufenhöhe, die in den Treppeneigenschaften definiert ist.
	Tür	Fügt Türen zum Gebäudemodell hinzu. Mit Hilfe der Typenwahl kann die Art der Tür angegeben werden oder eine Türfamilie in das Projekt geladen werden.
	Wand	Erstellt in dem Gebäudemodell eine (nicht-)tragende Wand. Mit Hilfe der Typenwahl wird der zu erstellende Wandtyp angegeben.
	Wandöffnung	Schneidet eine rechteckige Öffnung in eine gerade oder gebogene Wand. Am besten eine Ansicht wählen, in der die zu schneidende Wand angezeigt wird. Für Wände können nur rechteckige Öffnungen erstellt werden. Für runde oder andere abweichende Öffnungen ist die Wand auszuwählen und mit dem Werkzeug <i>Profil bearbeiten</i> zu ändern.

Symbol	Funktion	Beschreibung
Ingenieurbau		
	Einzelfundament	Fügt eine Gründung oder Pfahlkopfplatten zum Gebäudemodell hinzu. Einzelfundamente werden automatisch mit dem unteren Ende einer Stütze verbunden.
	Plattenfundament	Fügt eine Fundamentplatte zum Gebäudemodell hinzu. Fundamentplatten müssen nicht von anderen Tragwerkselementen getragen werden.
	Träger	Fügt einzelne Träger, eine Kette von Trägern oder Träger entlang einer Rasterlinie hinzu.
	Trägersystem	Erstellt ein Layout, mit dem die Anzahl und der Abstand einer Reihe von parallelen Trägern gesteuert wird.
	Wandfundament	Erstellt Fundamente für Wände. Ein Fundament ist auf die Wand beschränkt, die es trägt. Beim Verschieben der Wand wird auch das Fundament verschoben.
Gebäudetechnik		
	Elektrische Ausstattung	Fügt elektrische Ausstattung wie Schalttafeln und Schaltanlagen ein. In der Optionsleiste muss ein Verteilersystem angegeben werden, damit ein Stromkreis zugeordnet werden kann.
	Komponente	Verfügt über eine Palette an Bauteilen zu den Bereichen Elektroinstallation (u. a. Steckdosen), Kommunikation, Daten, Brandmelder, Lichtschalter, Notruf, Sicherheit und Telefon.
	Leerrohr	Zeichnet starre Leerrohrstrecken für den Bereich Elektro. In der Optionsleiste kann Durchmesser, Höhenversatz und Biegeradius des Leerrohrs angegeben werden.
	Leuchte	Fügt Decken-, Wand- oder Einbauleuchten ein. In der Eigenschaftenpalette kann ein Versatz eingegeben werden, um die Höhe der Leuchten festzusetzen.
	Rohr	Zeichnet starre Rohre. Horizontale Rohre sind besser in einer Draufsicht zu modellieren, vertikale und geneigte Rohre in einer (Schnitt-)Ansicht.
	Rohrformteil	Platziert ein Rohrformteil. Dazu gehören Bogen, T-Stücke, Abzweige, Kreuzstücke, Verbindungen und andere Typen von Formteilen. Bei einigen Rohrformteilen ist ein Verhalten für Einbauteile festgelegt. Sie können an beliebiger Stelle in ein starres Rohr eingefügt werden.
	Rohrzubehör	Platziert ein Rohrzubehöerteil. Dazu gehören Anschlussstücke, Ventile und Durchlauferhitzer. Beim Platzieren von Rohrzubehör muss dieses über vorhandene Rohre gezogen werden, um deren Dimensionen zu übernehmen.
Einfügen		
	Autodesk-Familie laden	Ermöglicht das Herunterladen einer Autodesk-Familie und Bauteilen aus der Cloud. In der Cloud kann nach einer Familie aus der vorgabemäßigen Revit-Bibliothek gesucht und im Anschluss in das aktive Dokument geladen werden.
	CAD importieren	Importiert Daten oder 3D-Geometrie aus anderen CAD-Programmen (z. B. Fusion 360) in ein Revit-Modell oder eine Revit-Familie.











Symbol	Funktion	Beschreibung
Beschriften		
	ausgerichtet	Fügt Bemaßungen zwischen parallelen Referenzen oder zwischen mehreren Punkten ein. Wenn der Mauszeiger über den Zeichenbereich bewegt wird, werden die Referenzpunkte, die für die Bemaßung verwendet werden können, hervorgehoben.
Körpermodell & Grundstück		
	Gelände	Definiert ein Gelände in einem Grundstücksplan oder einer 3D-Ansicht. Das Gelände kann definiert werden, indem Punkte ausgewählt und deren Höhe angegeben wird oder ein 3D-Datensatz bzw. eine Punktdatensatz importiert wird.
	Gebäudesohle	Fügt eine Sohle aus einer geschlossenen Schleife hinzu, die auf dem Gelände skizziert wird. Es muss zuerst ein Gelände erstellt werden, bevor eine Sohle eingefügt werden kann.
Ansicht		
	3D-Ansicht	Neben Standard-3D-Ansichten können Kameraperspektiven und animierte 3D-Walkthroughs erstellt werden.
	Rendern	Erstellt ein fotorealistisches Bild eines Gebäudemodells. Es können 3D-Ansichten mit verschiedenen Effekten und Inhalten wie Beleuchtung und Umgebung gerendert werden.
	Schnitt	Erstellt eine Schnittansicht. Schnittansichten schneiden das Modell. Sie können in Draufsichten, Schnittansichten oder Ansichten gezeichnet werden.
	Sichtbarkeit/ Grafiken	Überschreibt die vorgabemäßige Sichtbarkeit und grafische Ansicht von Modellelementen und Beschriftungen in der aktuellen Ansicht. Durch das Ausblenden einzelner Komponenten fällt die Bearbeitung beispielsweise während der Verlegung der Rohre leichter.
Ändern		
	Ausrichten	Richtet eines oder mehrere Elemente am ausgewählten Element aus.
	Bildstil	Hierüber lassen sich die Grafikoptionen des Modells ändern. Zur Auswahl stehen Drahtmodell, verdeckte Linie, schattiert, einheitliche Farben sowie realistisch.
	Detaillierungsgrad	Der Detaillierungsgrad bezieht sich auf alle gezeichneten Elemente des Gebäudemodells und unterscheidet sich zwischen grob, mittel und fein.
	Drehen	Dreht ausgewählte Elemente um die Achse. Alternativ können in der erscheinenden Leiste auch Zahlenwerte eingegeben werden.
	Eigenschaften	Blendet eine Palette ein oder aus, auf der die Exempleigenschaften angezeigt und bearbeiten werden können. Dabei werden immer die Eigenschaften für die aktuelle Ansicht, das ausgewählte Element oder das gerade platzierte Element gezeigt.
	Element teilen	Schneidet ein Element, z. B. eine Wand, an einem ausgewählten Punkt oder entfernt ein Segment zwischen zwei Punkten. Wenn eine Wand getrennt wird, entstehen mehrere Wände. Diese können unabhängig voneinander bearbeitet werden.













Symbol	Funktion	Beschreibung
Ändern		
	Kopieren	Kopiert ausgewählte Elemente und platziert sie an der angegebenen Position in der aktuellen Ansicht.
	Messen	Misst den Abstand zwischen zwei Elementen oder Referenzen.
	Sperren	Sperrt ein Modellelement in der aktuellen Position. Fixierte Elemente können nicht verschoben werden. Die Fixierung kann mit Hilfe der Funktion <i>Sperre aufheben</i> aufgelöst werden.
	Stutzen/Dehnen	Stutzt oder dehnt Elemente wie z. B. Träger oder Wände, um eine Ecke zu bilden. Wenn ein zu stutzendes Element ausgewählt wird, muss auf den Teil des Elements geklickt werden, der beibehalten werden soll.
	Verschieben	Verschiebt ausgewählte Elemente an die angegebene Position in der aktuellen Ansicht.

2. Autodesk InfraWorks

Symbol	Funktion	Beschreibung
Verwalten		
	Datenquellen	Importiert, konfiguriert und zeigt alle Datei- und Datenbankquellen an.
	Flächenlayer	Verwaltet die Reihenfolge und Sichtbarkeit von Oberflächen- und Teiloberflächendaten.
	Modelleigenschaften	Steuert die Modelleigenschaften für Koordinatensysteme, Länder-Kits, Entwurfstandards, Grenzen und Gelände.
	Modell-Explorer	Steuert Sichtbarkeit, Anzeige, Detailgenauigkeit und Auswählbarkeit von Objekten.
	Stilpalette	Verwaltet Stilkataloge und wendet Stile an.
	Vorschläge	Verwaltet alle Vorschläge und relevanten Informationen, einschließlich des Mastermodells (ursprüngliches Modell).
Erstellen		
	Brücke	Fügt parametrische Brücken zu Komponentenstraßen hinzu.
	Gebäude	Fügt Gebäude dem Geländemodell hinzu. Direkt im Anschluss muss der gewünschte Zeichnungsstil ausgewählt werden. Dieser entspricht der sichtbaren Fassade.
	Komponentenstraße	Fügt eine Straßenkonstruktion hinzu.
	Lineare Darstellung	Fügt eine lineare Darstellung hinzu. Dabei muss zunächst eine Komponente ausgewählt werden. In der Palette sind z. B. Strommasten hinterlegt. Auch die Straßen und Rohrleitungen werden anhand einer linearen Darstellung modelliert.
	Planstraße	Fügt Planstraßen hinzu. Direkt im Anschluss muss der gewünschte Zeichnungsstil ausgewählt werden. Dieser entspricht der sichtbaren Fahrbahnoberfläche.
	Rohrleitung	Fügt Rohrleitungen hinzu. Direkt im Anschluss muss der gewünschte Zeichnungsstil ausgewählt werden. Dieser entspricht den optischen und geometrischen Bedürfnissen.
	Stadtmöbel	Fügt 3D-Modellobjekte wie Schilder, Personen, Fahrzeuge und Hydranten hinzu. Diese können mit dem Zeichnungsstil aus einer Palette ausgewählt werden.
Präsentieren/Freigeben		
	Drehbucheerstellung	Erstellt eine Reihe von dynamischen Ansichten oder Videopfaden, die angezeigt und exportiert werden können.
	Drehbuch-Player	Gibt Drehbücher im Modell wieder.

3. Autodesk Fusion 360

Symbol	Funktion	Beschreibung
Volumenkörper		
	Ableitung einfügen	Zieht Konstruktionselemente aus einer anderen Konstruktion in die aktive Konstruktion und verknüpft sie mit ihr. Wenn die abgeleiteten Elemente in der ursprünglichen Konstruktion geändert werden, aktualisieren sich auch die abgeleiteten Elemente in der neuen Konstruktion.
	Abrunden	Rundet die Kanten eines Volumenkörpers durch Hinzufügen von Material zu Innenkanten und Entfernen von Material von Außenkanten ab. Für den Vorgang müssen Kanten oder Flächen ausgewählt werden und anschließend der Radius angegeben werden.
	Anordnung	Dupliziert Flächen, Körper, Elemente oder Komponenten in einer Konstruktion und verteilt sie entlang der definierten Anordnung. Dabei wird eine rechteckige oder eine runde Anordnung sowie eine Anordnung auf Pfad unterschieden.
	Ausrichten	Verschiebt ein Objekt durch Ausrichten der vom Objekt ausgewählten Geometrie an der an anderer Stelle ausgewählten Geometrie. Geometrie kann ein Punkt, eine Linie, eine Ebene oder ein Koordinatensystem sein. Beispielsweise werden zwei Flächen eines Würfels markiert. Durch das Ausrichten werden die beiden Objekte sozusagen an den beiden Flächen aneinandergeklebt.
	Bohrung	Erstellt eine Bohrung basierend auf benutzerdefinierten Werten und Auswahlen. Für die Bohrung müssen eine Fläche für die Platzierung und Kanten, um die Bohrung auf der Fläche zu positionieren, ausgewählt werden. Im Anschluss müssen Bohrungs- und Gewindetyp sowie die jeweiligen Größenwerte angegeben werden.
	Drücken/Ziehen	Ändert die ausgewählte Geometrie mit Versatz-, Extrusions- oder Abrundungsbefehlen. Der Vorgang hängt dabei von der ausgewählten Geometrie ab.
	Gelenk	Komponenten werden relativ zueinander in einer Baugruppe positioniert. Anschließend wird eine relative Bewegung zwischen diesen definiert.
	Kombinieren	Verbindet, schneidet bzw. schneidet zwei oder mehr Volumenkörper aus, um einen einzelnen Volumenkörper zu erstellen. Dafür muss ein Zielkörper und ein bzw. mehrere Werkzeugkörper ausgewählt werden, die mit dem Zielkörper kombiniert werden sollen.
	Körper teilen	Erstellt neue Körper, indem ausgewählte Körper mit einem Profil, einer Fläche oder einer Ebene geteilt werden.
	Messen	Misst Abstand, Winkel, Fläche oder Position der ausgewählten Objekte.

Symbol	Funktion	Beschreibung
Volumenkörper		
	Neue Komponente	Erstellt eine neue interne oder externe Komponente in der Baugruppe.
	Spiegeln	Erstellt eine Kopie ausgewählter Flächen, Körper, Elemente oder Komponenten, die an einer Ebene gespiegelt werden.
	Starre Gruppe	Sperrt die relativen Positionen der ausgewählten Komponenten. Die Komponenten werden als ein einzelnes Objekt behandelt, wenn sie verschoben werden oder wenn Gelenke angewendet werden.
	Verschieben/Kopieren	Verschiebt die ausgewählte Geometrie um den definierten Abstand oder im angegebenen Winkel.
Fläche		
	Darstellung	Weist Komponenten, Körpern oder Flächen in einer Konstruktion Darstellungen zu, um die Farbe oder Textur ihrer Materialien zu überschreiben, ohne die physischen Konstruktionseigenschaften zu beeinflussen.
	Entfernen	Löscht ausgewählte Komponenten oder Körper aus der Konstruktion und behält die Operation als Element auf der Zeitachse bei. Entfernte Objekte können parametrisch wiederhergestellt werden.
	Extrusion	Fügt offenen oder geschlossenen Skizzenprofilen oder ebenen Flächen eine Tiefe hinzu.
	Löschen	Löscht ausgewählte Objekte und alle damit verbundenen Objekte dauerhaft aus der Konstruktion. Es wird kein Element auf der Zeitachse erstellt. Gelöschte Objekte können nicht parametrisch wiederhergestellt werden.
	Material	Weist Komponenten und Körpern in einer Konstruktion Materialien zu, um ihre thermischen, mechanischen, Festigkeits- und erweiterten konstruktionsbezogenen Eigenschaften sowie ihre Darstellung zu steuern.
	Skizze erstellen	Ruft den Skizzenmodus auf, in dem geometrische Profile erstellt werden, die als Basis für die Konstruktion dienen. Aus diesen können dann mit Hilfe anderer Funktionen dreidimensionale Körper erstellt werden.
Rendern		
	Rendern	Erstellt ein qualitativ hochwertiges gerendertes Bild der Szene mithilfe von Cloud- oder lokaler Hintergrund-Render-Technologie.
	Szeneeinstellung	Legt die Umgebung und Beleuchtung für die Szene fest. Diese Einstellung wirkt sich nur auf den Render-Arbeitsbereich aus.

Literaturverzeichnis

- Adobe (2023):** DWG-Dateien. Online verfügbar unter <https://www.adobe.com/de/creativecloud/file-types/image/vector/dwg-file.html>, zuletzt geprüft am 11.08.2023.
- Agora-tec GmbH (2023):** Agora-Tec® Pumpen Steuerung Druckschalter Durchflusswächter AT-DWv-15-MCU verkabelt (Abschalt Druck einstellbar) mit Trockenlaufschutz (MCU), Überdruck Überwachung. Online verfügbar unter <https://www.agora-tec.de/shop/Pumpensteuerung-Druckschalter-mit-Trockenlaufschutz/Agora-Tec-R-Pumpen-Steuerung-Druckschalter-Durchflusswaechter-AT-DWv-15-MCU-verkabelt-Abschalt-Druck-einstellbar-mit-Trockenlaufschutz-MCU-Ueberdruck-Ueberwachung::2944.html>, zuletzt geprüft am 06.09.2023.
- ALLPLAN Deutschland GmbH (2023):** Allplan kaufen. Online verfügbar unter <https://www.allplan.com/de/beratung-verkauf/allplan-kaufen/>, zuletzt geprüft am 13.08.2023.
- ALLPLAN Schweiz AG (2023):** Allplan Helpdesk - 1.1 Bildschirmoberfläche. Online verfügbar unter <https://lernen.allplan.ch/mod/book/tool/print/index.php?id=679>, zuletzt geprüft am 12.08.2023.
- ASR A 2.1, 2012: 2012-11-20,** Technische Regeln für Arbeitsstätten - Schutz vor Absturz und herabfallenden Gegenständen, Betreten von Gefahrenbereichen.
- ASR A 3.4, 2023-05-02,** Technische Regeln für Arbeitsstätten - Beleuchtung und Sichtverbindung.
- Autodesk (2019):** Wie in Revit unterirdische Räume und Schächte in Geländemodell schneiden? Online verfügbar unter <https://forums.autodesk.com/t5/revit-bim-360-deutsch/wie-in-revit-unterirdische-raume-und-schachte-in-gelandemodell/td-p/9119084>, zuletzt geprüft am 04.09.2023.
- Autodesk (2023a):** Autodesk-Produkte. Online verfügbar unter <https://www.autodesk.de/products?page=2>, zuletzt geprüft am 13.08.2023.
- Autodesk (2023b):** InfraWorks: Modellieren Sie Gebäude- und Infrastrukturentwurfskonzepte im realen Kontext. Online verfügbar unter <https://www.autodesk.de/products/infraworks/overview?term=1-YEAR&tab=subscription>, zuletzt geprüft am 11.08.2023.
- Autodesk (2023c):** Was ist Autodesk Fusion 360? Online verfügbar unter <https://www.autodesk.de/solutions/what-is-fusion-360>, zuletzt geprüft am 11.08.2023.
- Bagherpour Kashani, Natascha (2023):** The Water Project | A cultural heritage site “dries up”. Hg. v. L.I.S.A. Wissenschaftsportal Gerda Henkel Stiftung. Online verfügbar unter https://lisa.gerda-henkel-stiftung.de/the_water_project_a_cultural_heritage_site_dries_up?nav_id=11055, zuletzt geprüft am 08.09.2023.
- Bauformel Verlag GmbH (Hg.) (2019):** Reichweite einer Grundwasserabsenkung. Berechnung nach den Formeln von Sichardt und Kussakin. Online verfügbar unter <https://www.bauformeln.de/geotechnik/wasser-und-grundwasserhaltung/reichweite-einer-grundwasserabsenkung>, zuletzt geprüft am 09.08.2023.
- Baur, Andreas; Fritsch, Peter; Hoch, Winfried; Merkl, Gerhard; Rautenberg, Joachim; Weiß, Matthias; Wricke, Burkhard (2019):** Mutschmann/Stimmelmayer Taschenbuch der Wasserversorgung. 17. Aufl. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- BMVI (2015):** Stufenplan Digitales Planen und Bauen. Einführung moderner, IT-gestützter Prozesse und Technologien bei Planung, Bau und Betrieb von Bauwerken. Hg. v. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). Berlin.

-
- DBM; AMF; IWAR (2018):** Wasser, Bildung und Tourismus in der ländlichen Maneshan-Region/Iran. Projektantrag im Rahmen der Förderlinie „Humanitarian and Welfare Projects“ der Gerda Henkel Stiftung. Hg. v. Deutsches Bergbau-Museum Bochum (DBM), Archäologisches Museum Frankfurt (AMF) und Institut IWAR, Technische Universität Darmstadt.
- DGUV (2019):** DGUV Information 208-053: Mensch und Arbeitsplatz - Physische Belastungen. Hg. v. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV). Online verfügbar unter https://www.bgbau.de/fileadmin/Medien-Objekte/Medien/DGUV-Informationen/208_053/208-053_BGBAU_web.pdf, zuletzt geprüft am 02.09.2023.
- Dierks, Klaus; Wormuth, Rüdiger (2012):** Baukonstruktion. 7., neu bearbeitete und erweiterte Aufl. Köln: Werner.
- DIGImasaleh (Hg.) (2023):** Großhandel - Baumaterialien. Online verfügbar unter digimasaleh.com, zuletzt geprüft am 05.03.2023.
- DIN 18015-1: 2020-05,** Elektrische Anlagen in Wohngebäuden_ - Teil_1: Planungsgrundlagen.
- DIN 18040-1: 2023-02,** Barrierefreies Bauen_ - Planungsgrundlagen_ - Teil_1: Öffentlich zugängliche Gebäude.
- DIN 18065: 2020-08,** Gebäudetreppen_ - Begriffe, Messregeln, Hauptmaße.
- DIN 18100: 1983-10,** Türen; Wandöffnungen für Türen; Maße entsprechend DIN_4172.
- DIN 18531-1: 2017-07,** Abdichtung von Dächern sowie von Balkonen, Loggien und Laubengängen_ - Teil_1: Nicht genutzte und genutzte Dächer_ - Anforderungen, Planungs- und Ausführungsgrundsätze.
- DIN 18533-1: 2017-07,** Abdichtung von erdberührten Bauteilen_ - Teil_1: Anforderungen, Planungs- und Ausführungsgrundsätze.
- DIN 18799-1: 2019-06,** Ortsfeste Steigleiteranlagen an baulichen Anlagen_ - Sicherheitstechnische Anforderungen und Prüfungen_ - Teil_1: Steigleitern mit Seitenholmen.
- DIN 2403: 2018-10,** Kennzeichnung von Rohrleitungen nach dem Durchflusstoff.
- DIN 40430: 1971-02,** Stahlpanzerrohr-Gewinde; Maße.
- DIN 4124: 2012-01,** Baugruben und Gräben_ - Böschungen, Verbau, Arbeitsraumbreiten.
- DIN 4926: 2016-12,** Brunnenköpfe aus Stahl_ - DN_300 bis DN_1200.
- DIN CEN ISO/TR 7250-2:2013-08:** Wesentliche Maße des menschlichen Körpers für die technische Gestaltung - Teil 2: Anthropometrische Datenbanken einzelner nationaler Bevölkerungen, zuletzt geprüft am 11.09.2023.
- DIN EN 1092-1: 2018-12,** Flansche und ihre Verbindungen_ - Runde Flansche für Rohre, Armaturen, Formstücke und Zubehörteile, nach PN_bezeichnet_ - Teil_1: Stahlflansche; Deutsche Fassung EN_1092-1:2018.
- DIN EN 12831-1: 2017-09,** Energetische Bewertung von Gebäuden_ - Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast_ - Teil_1: Raumheizlast, Modul M3-3; Deutsche Fassung EN_12831-1:2017.
- DIN EN 1990: 2021-10** Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung.
- DIN EN 1991: -1-1:2010-12, Eurocode_1:** Einwirkungen auf Tragwerke_ - Teil_1-1: Allgemeine Einwirkungen auf Tragwerke_ - Wichten, Eigengewicht und Nutzlasten im Hochbau; Deutsche Fassung EN_1991-1-1:2002_ + AC:2009.
- DIN EN 1998-1:** Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben – Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbauten; Deutsche Fassung EN 1998-1:2004 + AC:2009.

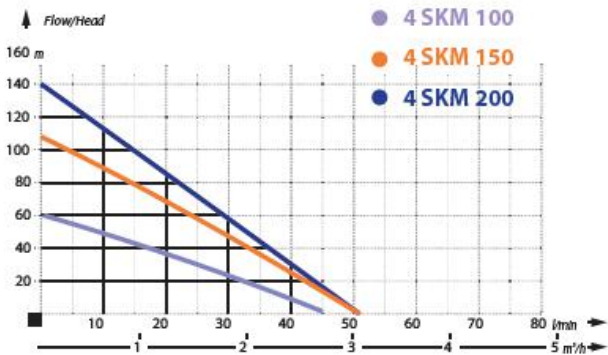
-
- DIN EN 50565-1, 2015-02, VDE 0298-565-1:2015-02**, Kabel und Leitungen - Leitfaden für die Verwendung von Kabeln und isolierten Leitungen mit einer Nennspannung nicht über 450/750 V (U₀/U) - Teil 1: Allgemeiner Leitfaden; Deutsche Fassung EN 50565-1:2014.
- DIN EN ISO 13793: 2001-06**, Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden - Wärmetechnische Bemessung von Gebäudegründungen zur Vermeidung von Frosthebung (ISO_13793:2001); Deutsche Fassung EN_ISO_13793:2001.
- DIN EN ISO 3126: 2005-05**, Kunststoff-Rohrleitungssysteme - Rohrleitungsteile aus Kunststoffen - Bestimmung der Maße (ISO_3126:2005); Deutsche Fassung EN_ISO_3126:2005.
- DIN EN ISO 4034: 2013-04**, Sechskantmuttern (Typ_1) - Produktklasse_C (ISO_4034:2012); Deutsche Fassung EN_ISO_4034:2012.
- DIN VDE 0100-520, 2023-06**, Errichten von Niederspannungsanlagen - Teil 5-52: Auswahl und Errichtung elektrischer Betriebsmittel - Kabel- und Leitungsanlagen.
- Donner, Chris (2023)**: Schwimmerschalter. Online verfügbar unter <https://tauchpumpe-tests.de/schwimmerschalter/#>, zuletzt geprüft am 06.09.2023.
- DVGW (2009)**: Wasser-Information Nr. 72. Nanofiltration und Umkehrosmose. Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. Bonn.
- DVGW G 462 (A), 2020**: Gasleitungen aus Stahlrohren bis 16 bar Betriebsdruck; Errichtung.
- DVGW W 101 (A), 2021**: Richtlinien für Trinkwasserschutzgebiete; Teil 1: Schutzgebiete für Grundwasser.
- DVGW W 111, 2015**: Pumpversuche bei der Wassererschließung.
- DVGW W 122 (A), 2013**: Abschlussbauwerke für Brunnen der Wassergewinnung.
- DVGW W 123, 2001**: Bau und Ausbau von Vertikalfilterbrunnen.
- DVGW W 270, 2007**: Vermehrung von Mikroorganismen auf Werkstoffen für den Trinkwasserbereich - Prüfung und Bewertung.
- DVGW W 300-1 (A), 2014**: Trinkwasserbehälter; Teil 1: Planung und Bau.
- DVGW W 332, 2006**: Auswahl, Einbau und Betrieb von metallischen Absperrarmaturen in Wasserverteilungsanlagen.
- DVGW W 397, 2007**: Ermittlung der erforderlichen Verlegetiefen von Wasseranschlussleitungen.
- DVGW W 400-1, 2022**: Technische Regeln Wasserverteilungsanlagen (TRWV); Teil 1: Planung.
- Eichhorn, Christian (2020)**: Development of a concept for the water supply of the village Hamzehlu as well as a visitor center at the salt mine Chehrabad (Iran) with process and drinking water. Masterarbeit. Technische Universität Darmstadt, Darmstadt. IWAR, Fachgebiet Wasserversorgung und Grundwasserschutz. Online verfügbar unter <http://tubama.ulb.tu-darmstadt.de/19774/>, zuletzt geprüft am 07.08.2023.
- Europäische Kommission (2022)**: PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM. Online verfügbar unter https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/, zuletzt geprüft am 30.08.2023.
- FM Global (2023a)**: About natural hazard maps. Online verfügbar unter <https://www.fmglobal.com/research-and-resources/nathaz-toolkit/about-global-flood-map>, zuletzt geprüft am 17.08.2023.
- FM Global (2023b)**: Natural Hazard Map. Online verfügbar unter <https://www.fmglobal.com/research-and-resources/nathaz-toolkit/flood-map>, zuletzt geprüft am 17.08.2023.
-

-
- Garten-Zisternen (Hg.) (2021):** vollbiologische Kleinkläranlage solid-clAir. Online verfügbar unter <https://www.garten-zisternen.de/blog/vollbiologische-kleinklaeranlage-solid-clair>, zuletzt geprüft am 30.08.2023.
- Gasunternehmen der Provinz Zanjan (2022):** Gas-Route der Dörfer: Gog Tepe, Gogolhayan, Ebrahimabad, Rezaabad, upper Andabad, Mehrabad, Hamzehloo, Chehrabad und lower Qezelje.
- Google Earth (2021):** Online verfügbar unter <https://earth.google.com/web/@36.91996529,47.85044275,1323.9105323a,2876.76209828d,30y,0h,0t,0r>, zuletzt geprüft am 15.08.2023.
- Helukabel (2021):** Helukabel - Helupower - Aquatic-750-blue. Online verfügbar unter https://www.helukabel.de/de-de/Newsroom/Beitrag/Beitrag_3392.html, zuletzt geprüft am 01.09.2023.
- Hydrosens (2023):** Diver-Office: Software für die Verwaltung Ihrer Diver-Grundwasserdatenlogger. Online verfügbar unter <https://www.hydrosens.com/produkte/software/diver-office/>, zuletzt geprüft am 14.08.2023.
- Hydrotechnik GmbH (Hg.) (2023):** Kabellichtlote. Online verfügbar unter <https://www.ht-hydrotechnik.com/de/produkte/handmessgeraete/kabellichtlot/>, zuletzt geprüft am 09.08.2023.
- IR 1011 (2016):** Drinking water - microbiological specifications. Hg. v. Institute of Standards and Industrial Research of Iran (ISIRI).
- IR 1053 (2016):** Drinking water - physical and chemical specifications. Hg. v. Institute of Standards and Industrial Research of Iran (ISIRI).
- Kaczmarczyk, Christel; Kuhr, Harald; Strupp, Petra; Schmidt, Jürgen; Schmidt, Arne (2010):** Bautechnik für Bauzeichner. Zeichnen - Rechnen - Fachwissen ; mit Tabellen. 2., überarb. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner (Berufliche Bildung).
- Kauer, Josef; Lehmkuhler, Hardy; Steinmann, Rasso (Hg.) (2022):** BIM & GIS. Grundlagen, Synergien und Best-Practice-Beispiele. Berlin: Wichmann.
- Kern GmbH (2023):** Kunststoff-Lexikon: Heizelementschweißen. Online verfügbar unter <https://www.kern.de/de/kunststofflexikon/heizelementschweissen>, zuletzt geprüft am 16.08.2023.
- LG Chem (2017):** Data Sheet Brackish Water Reverse Osmosis (RO) Membranes. LG BW 4040 R. Online verfügbar unter <https://www.lgwatersolutions.com/en/product/brackish-water-ro/LG-BW-4040-R>, zuletzt geprüft am 15.08.2023.
- Melin, Thomas; Rautenbach, Robert (2007):** Membranverfahren. Grundlagen der Modul- und Anlagenauslegung. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Nemetschek SE (2023):** ALLPLAN. Online verfügbar unter <https://www.nemetschek.com/de/marke/allplan>, zuletzt geprüft am 11.08.2023.
- Neumüller, Peter (2023):** Durchflusswächter BRIO® Automatic-Controller, unverkabelt. Online verfügbar unter https://www.profi-pumpe.de/TAUCHPUMPEN/Zubehoer-Tauchpumpen/Durchflusswaechter-BRIO-R-Automatic-Controller-unverkabelt::1329.html?gclid=EAIaIQobChMI3I-IxtyTgQMvHVBBaH3grQJCEAQYBSABEGIsGfD_BwE, zuletzt geprüft am 06.09.2023.
- Pfingsthorn, Matias (2020):** Geoelectric investigations of the detection of groundwater sources in the area of Hamzehloo, Zanjan, Iran. Bachelor Thesis. Brandenburg University of Technology, Cottbus. Chair of Raw Material and Natural Resource Management, zuletzt geprüft am 13.04.2020.




-
- PHU Dambat (2018):** Product catalogue - water pumps, motors, accessories. Online verfügbar unter <https://www.dambat.com/upload/IBO-CATALOGUE-2018.pdf>, zuletzt geprüft am 16.08.2023.
- Räbiger, Norbert; Helmers, Thorben; Wessolowski, Holger (2023):** sequencing batch reactor [SBR]. Online verfügbar unter <http://www.wasser-wissen.de/abwasserlexikon/s/sequencingbatchreactor.htm>, zuletzt geprüft am 30.08.2023.
- Robert McNeel & Associates (2023a):** Europa - Kaufoptionen. Online verfügbar unter <https://www.rhino3d.com/de/sales/europe/Germany/>, zuletzt geprüft am 13.08.2023.
- Robert McNeel & Associates (2023b):** Rhino - Eigenschaften. Übersicht. Online verfügbar unter <https://www.rhino3d.com/features/#overview>, zuletzt geprüft am 11.08.2023.
- Schlumberger Water Services (Hg.) (2014):** Diver Manual. Delft, Niederlande.
- statista (2023):** Jährlicher Stromverbrauch eines 4-Personen-Haushalts in Deutschland nach Gebäudetyp im Jahr 2022 (in Kilowattstunden). Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/558288/umfrage/stromverbrauch-einen-4-personen-haushalts-in-deutschland/>, zuletzt geprüft am 30.08.2023.
- VDI 6000 Blatt 1, 2022: 2022-07** - Entwurf, Sanitärtechnik - Sanitärräume - Grundlagen.
- Vectorworks (2023):** NURBS-Kurven und -Flächen. Online verfügbar unter https://vectorworks-hilfe.computerworks.eu/2023/Vectorworks-Hilfe/3D-Modellieren/NURBS-Kurven_und_Flaechen.htm?agt=index, zuletzt geprüft am 11.08.2023.
- WRI (2023):** Aqueduct Water risk atlas. World Resources Institute (WRI). Online verfügbar unter <https://www.wri.org/applications/aqueduct/water-risk-atlas>, zuletzt geprüft am 09.09.2023.
- WTI (2023):** PE-HD Rechteck Tank - Wassertank 4.000 Liter. Online verfügbar unter <https://www.wasseraufbereitung-shop24.de/de/behaelter-pe-hd-4-000-liter>, zuletzt geprüft am 04.09.2023.
- Yori, Robert; Kim, Marcus; Kirby, Lance (2020):** Mastering Autodesk Revit 2020. Indianapolis, Indiana: John Wiley & Sons.

4"SKM / 4"SKT

4-inch peripheral deep well pumps of 98 mm in diameter. Pumps intended for boreholes of at least 4-inch profile. The pumps were manufactured with durable materials such as stainless steel and brass, which was used to build pump rotors. Pumps are equipped with a 14 m cable ended with a plug as a standard. Thanks to building the capacitor in the motor, thanks to which the pump is operative right after unpacking. The 4SKM pumps are equipped with thermal protection mounted in the motor winding. The pumps are available in the single-phase 4SKM - 230V ~ / 50Hz version and in the three-phase 4SKT -400V ~ 3/ 50Hz version.



APPLICATION:
Supply of water from deep well intakes to one-family houses and holiday houses and watering gardens.



PARAMETERS

Name	Head (m)	Flow (l/min)	Motor power (W)	Power supply (V)	Power consumption (A)	Ports (inches)	Dimensions (mm) (Diam./H)	Weight (kg)
4SKM 100	60	45	750	230	5,8	1	98/530	15
4SKM 150	107	50	1100	230/400	10	1	98/530	16
4SKM 200	140	50	1500	230/400	11	1	98/540	17

Abbildung 91: Datenblatt der Tauchmotorpumpe 4SKM200 (PHU Dambat 2018)

Data Sheet



**Brackish Water
Reverse Osmosis (RO) Membranes**
LG BW 4040 R
High Rejection

Overview

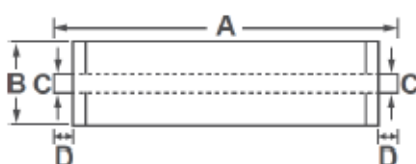
LG Chem's NanoH₂O™ brackish water RO membranes serve various municipal and industrial applications and have been operating in the major utilities around the world. Incorporating innovative Thin Film Nanocomposite (TFN) technology, all LG BWRO membranes provide superior performance along with intrinsic anti-fouling property and are suitable for applications where consistent and reliable performance is a must.

LG BW R membranes offer a combination of high rejection and reliability: suitable for high salinity brackish water and wastewater reuse applications.

Product Specifications

Active Membrane Area, ft ² (m ²)	Permeate Flow Rate, GPD (m ³ /d)	Stabilized Salt Rejection, %	Minimum Salt Rejection, %	Feed Spacer, mil
85 (7.9)	2,500 (9.5)	99.6	99.3	28

Test Conditions : 2,000 ppm NaCl at 25°C (77°F), 225 psi (15.5 bar), pH 7, Recovery 15%.
Permeate flows for individual elements may vary +/-20%.



A, mm (in.)	B, mm (in.)	C, mm (in.)	D, mm (in.)	Weight kg (lbs.)
1,016 (40)	100 (3.9)	19 (0.75)	29 (1.1)	4.0 (8.8)

All dimensional information is indicative and for reference purpose only. Please contact LG Chem for detailed technical specification.

Operating Specifications

For more information and operating guidelines, visit www.lgwatersolutions.com

Max. Applied pressure	600 psi (41 bar)
Max. Chlorine concentration	< 0.1 ppm
Max. Operating temperature	45°C (113°F)
pH Range, Continuous (Cleaning)	2-11 (2-12)
Max. Feedwater turbidity	1.0 NTU
Max. Feedwater SDI (15 mins)	5.0
Max. Feed flow	16 gpm (3.6 m ³ /h)
Max. Pressure drop (ΔP) for each element	15 psi (1.0 bar)

The Membrane Elements performance is expressly conditioned on Buyer's storing, installing, operating, and maintaining Product in accordance with industry-accepted good practices and Seller's written instructions provided in the Seller's Technical Manual, which consists of LG Chem, Ltd [Technical Service Bulletins \("TSB"\)](#) and [Technical Applications Bulletins \("TAB"\)](#) and may be viewed and downloaded at www.lgwatersolutions.com.

The information and data contained herein are deemed to be accurate and reliable and are offered in good faith, but without guarantee of performance. LG Chem assumes no liability for results obtained or damages incurred through the application of the information contained herein. Customer is responsible for determining whether the products and information presented herein are appropriate for the customer's use and for ensuring that customer's workplace and disposal practices are in compliance with applicable laws and other governmental enactments. Specifications subject to change without notice. NanoH₂O is the Trademark of The LG Water Solutions or an affiliated company of LG Chem. All rights reserved. © LG Chem, Ltd.

Contact LG Water Solutions www.lgwatersolutions.com | waterinfo@lgchem.com

(06.21)
NanoH₂O™



Abbildung 93: Draufsicht auf das Untersuchungsgebiet in InfraWorks (eigene Aufnahme)



Abbildung 94: Beispiel einer Stellwand im Besucherzentrum
(eigene Darstellung mit Aufnahmen des Deutschen Bergbau-Museums Bochum)



Abbildung 95: Implementierung des Besucherzentrums in das digitale Geländemodell (eigene Darstellung)

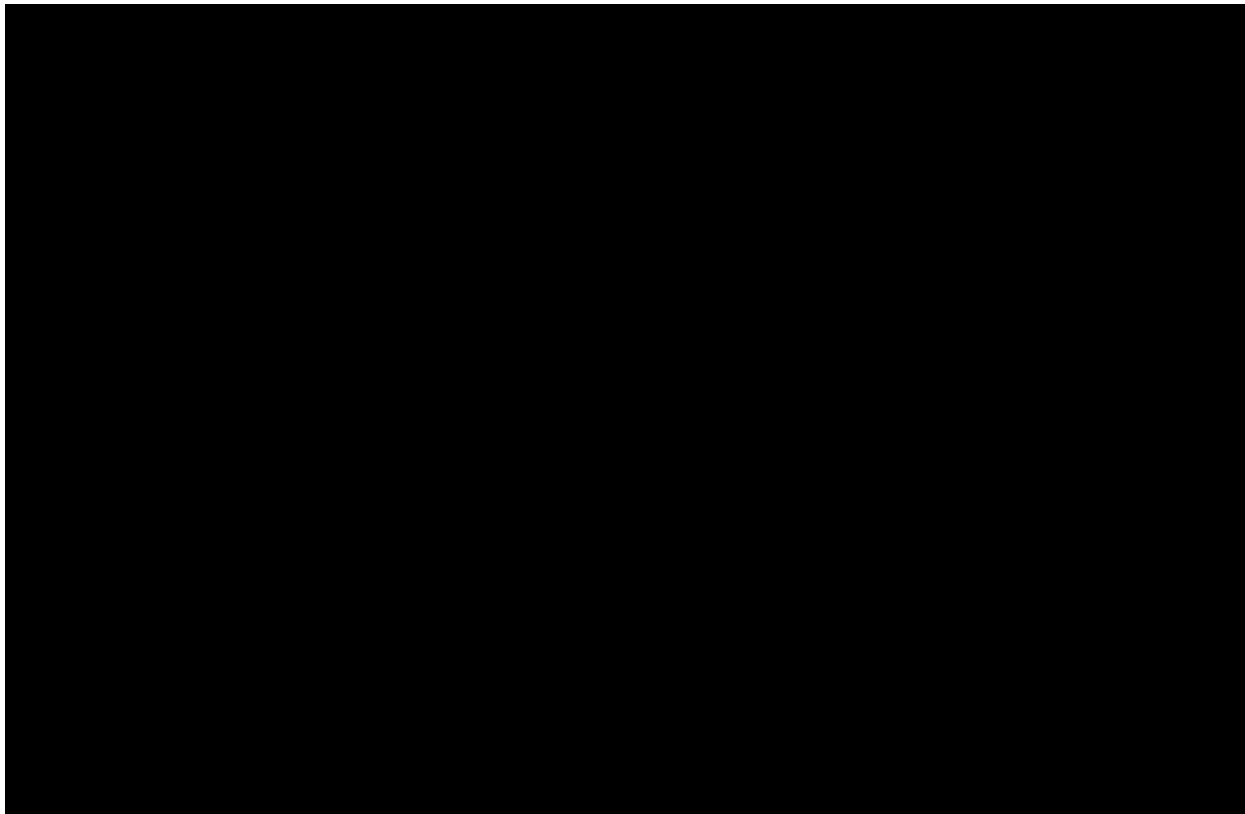


Abbildung 96: Verlauf der Gastrasse in der Region um Hamzehloo
(Gasunternehmen der Provinz Zanjan 2022, aus rechtlichen Gründen unkenntlich gemacht)

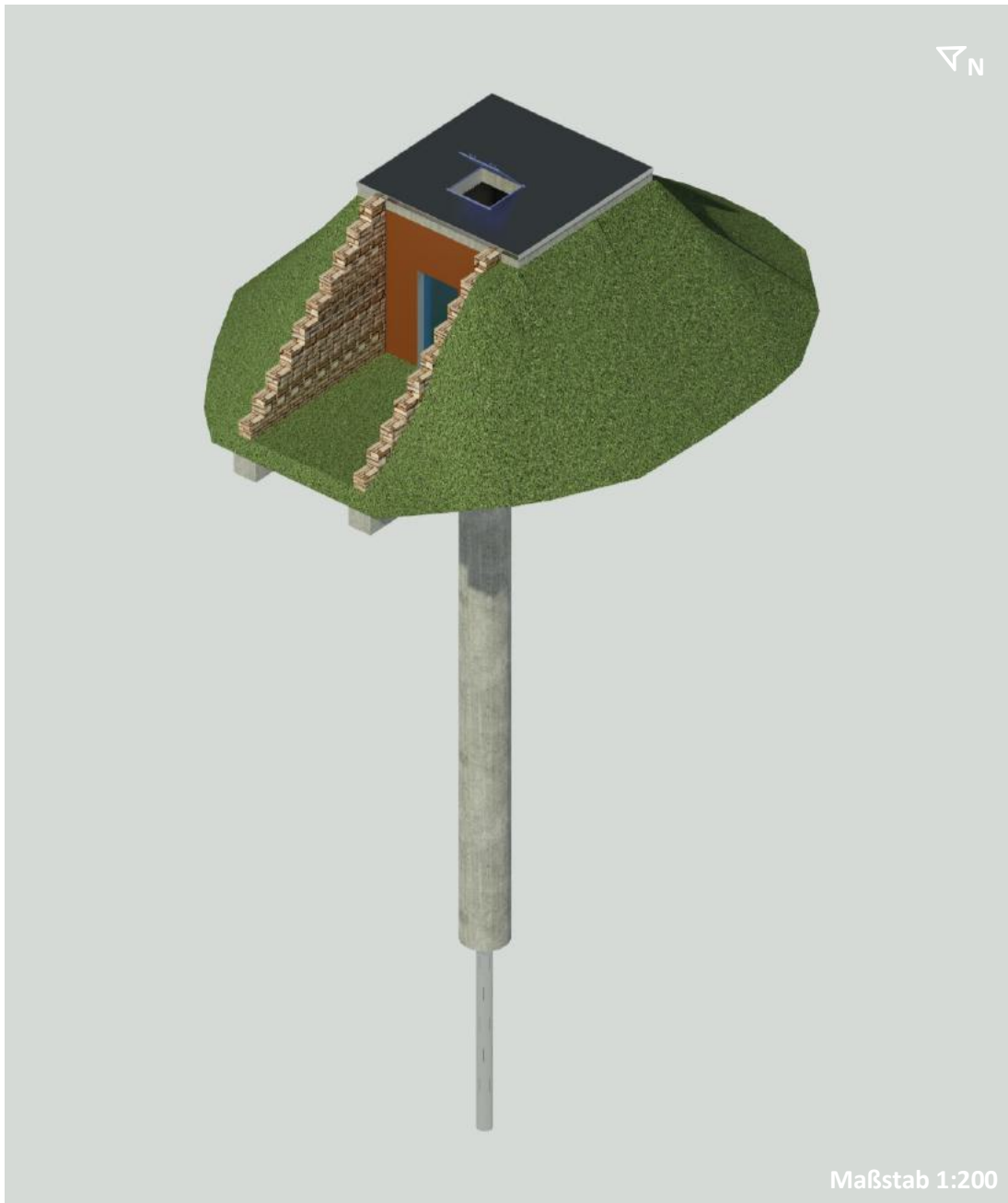


Abbildung 97: Außenansicht des Brunnenhauses inklusive des Brunnens (eigene Darstellung)

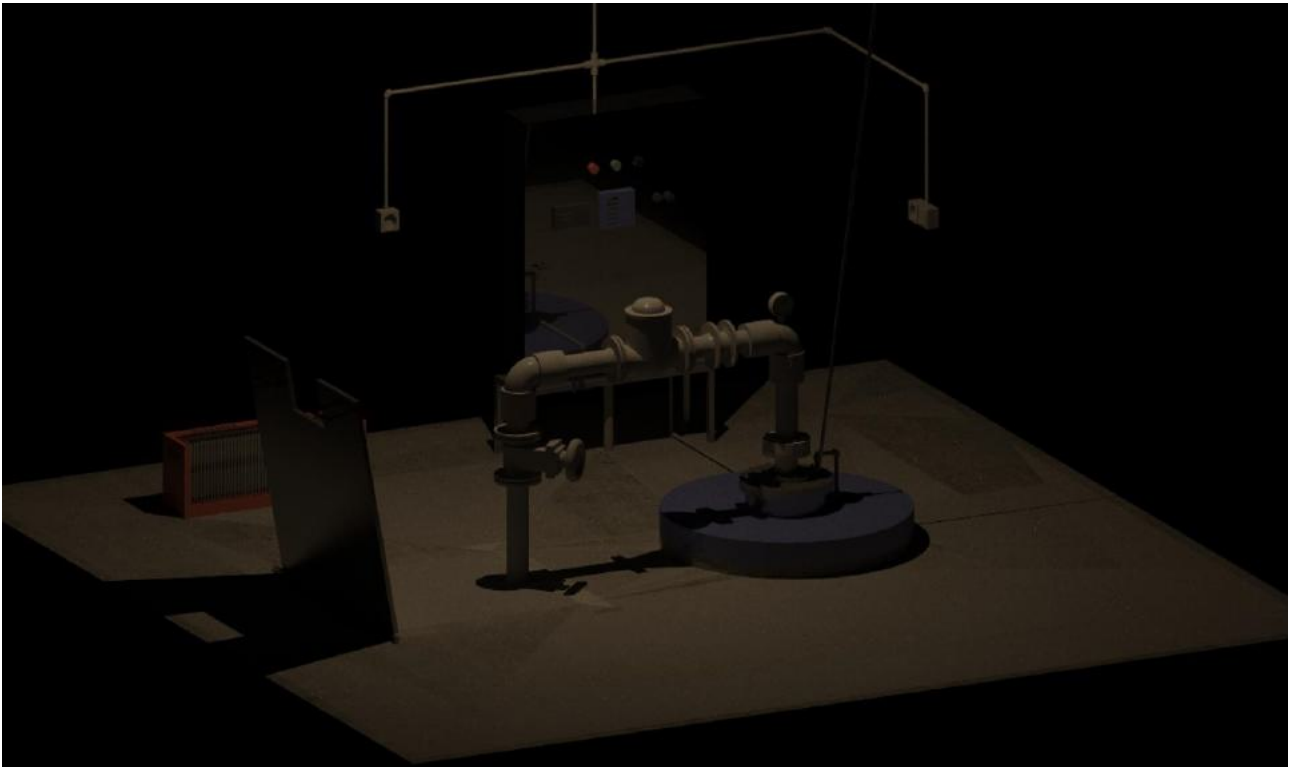


Abbildung 98: Innenraum der Brunnenstube bei künstlicher Beleuchtung (eigene Darstellung)



Abbildung 99: Gebäude der Aufbereitungsanlage mit der mobilen Holzrampe (eigene Darstellung)

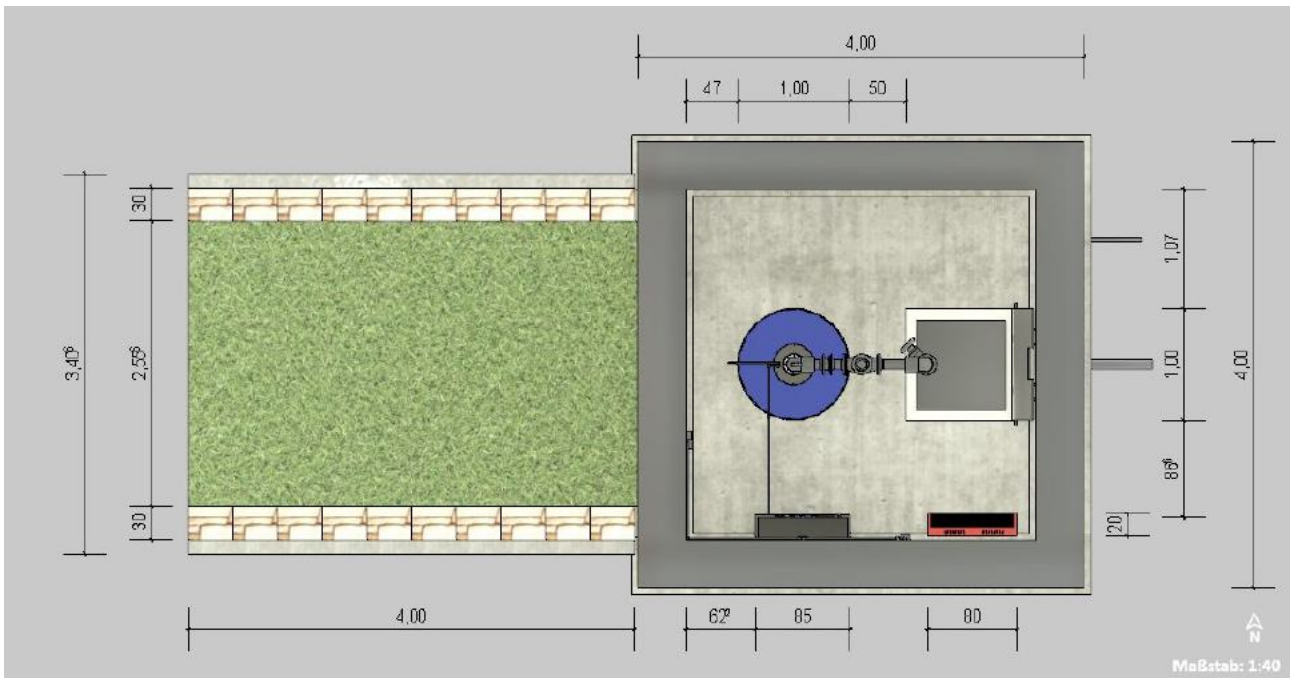


Abbildung 100: Grundriss des Brunnenhauses mit Bemaßungen (eigene Darstellung)

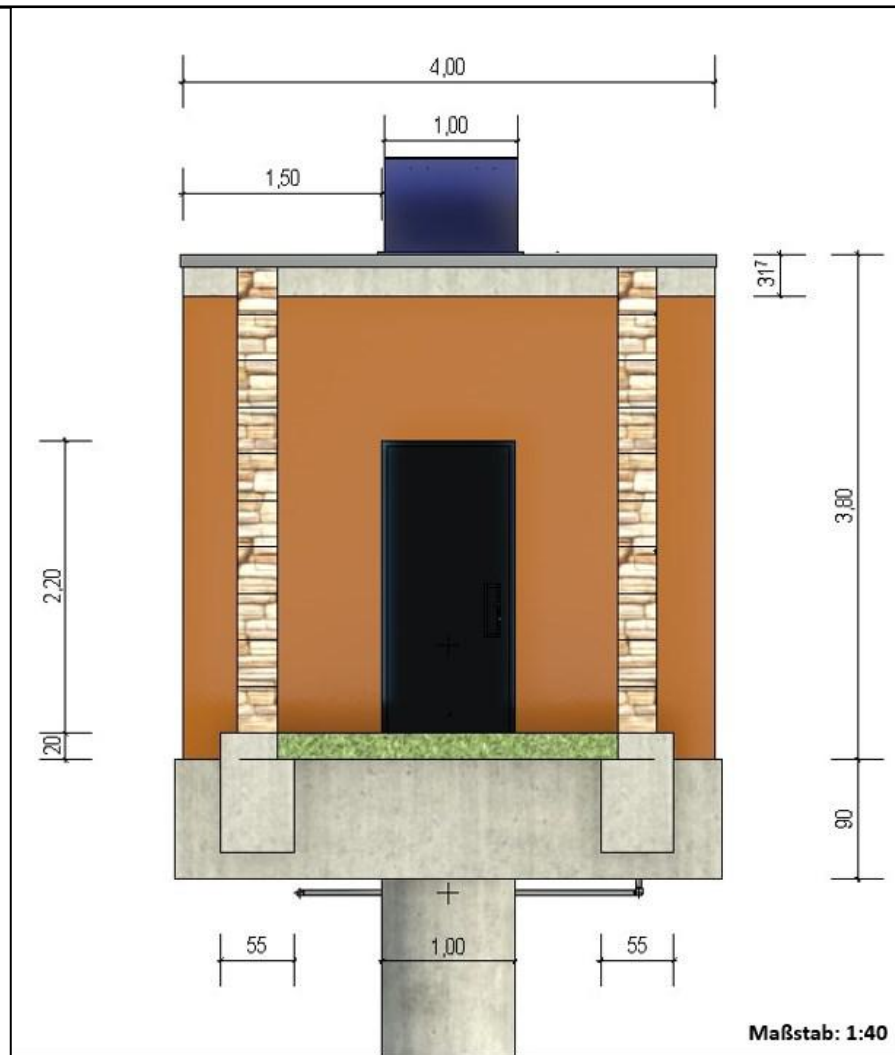


Abbildung 101: Seitenansicht West des Brunnenhauses mit Bemaßungen (eigene Darstellung)

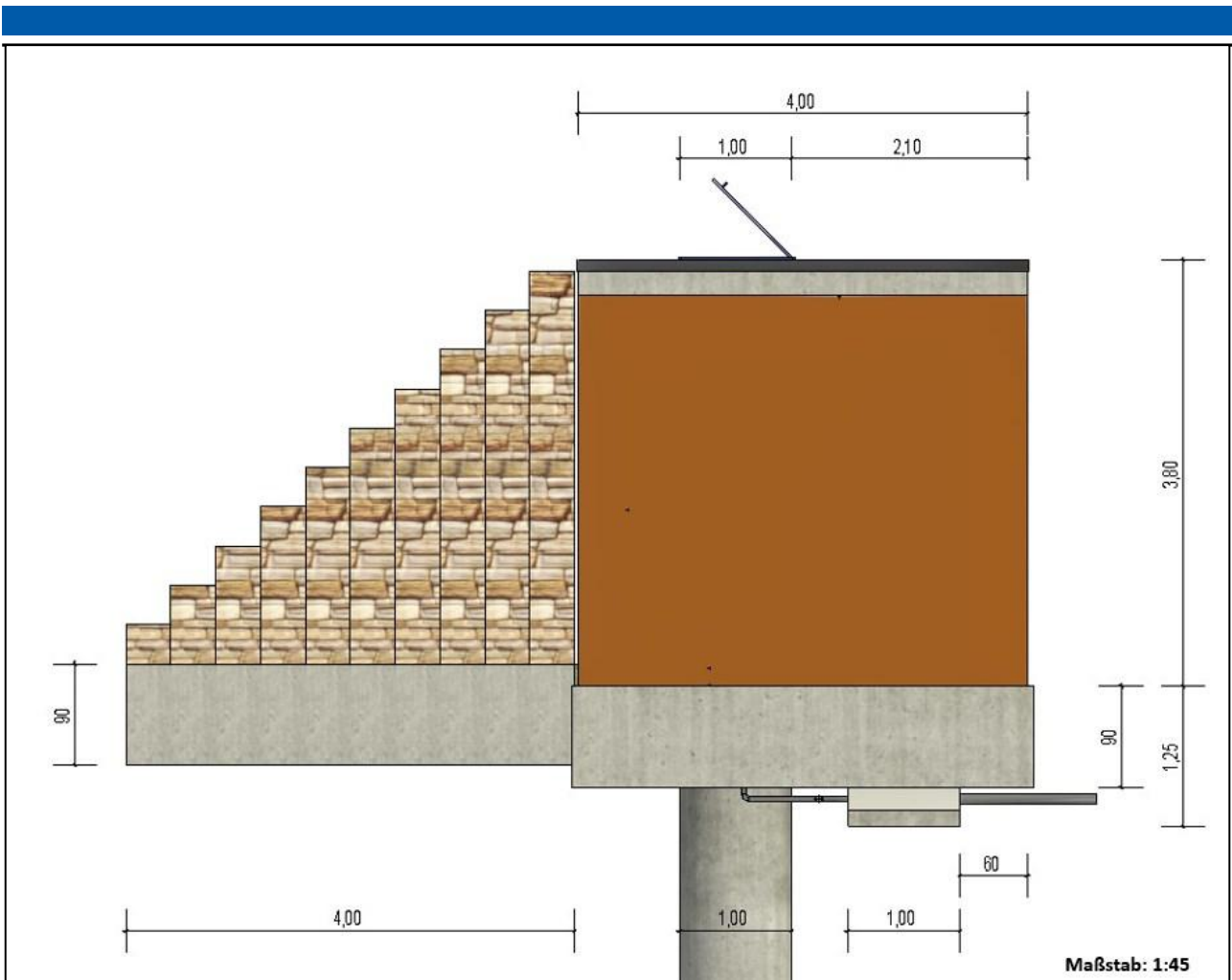


Abbildung 102: Seitenansicht Süd des Brunnenhauses mit Bemaßungen (eigene Darstellung)

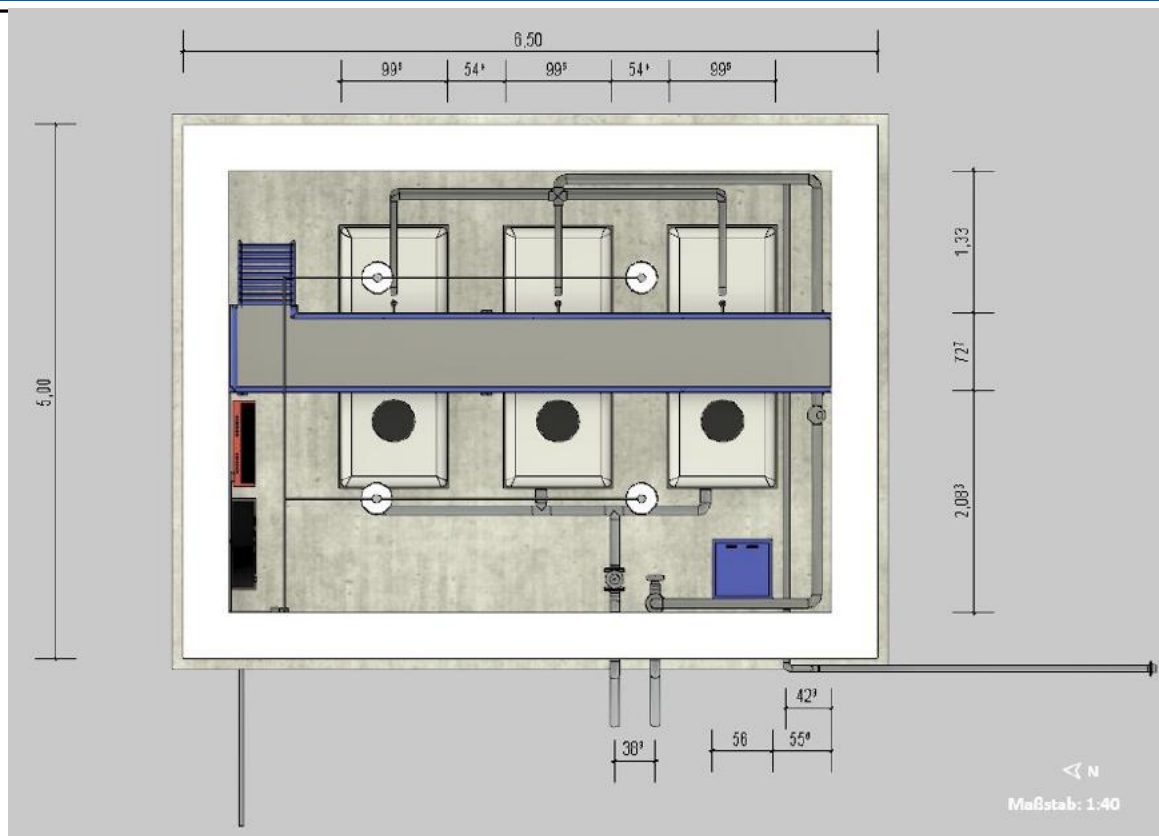


Abbildung 103: Grundriss des Reservoirs mit Bemaßungen (eigene Darstellung)

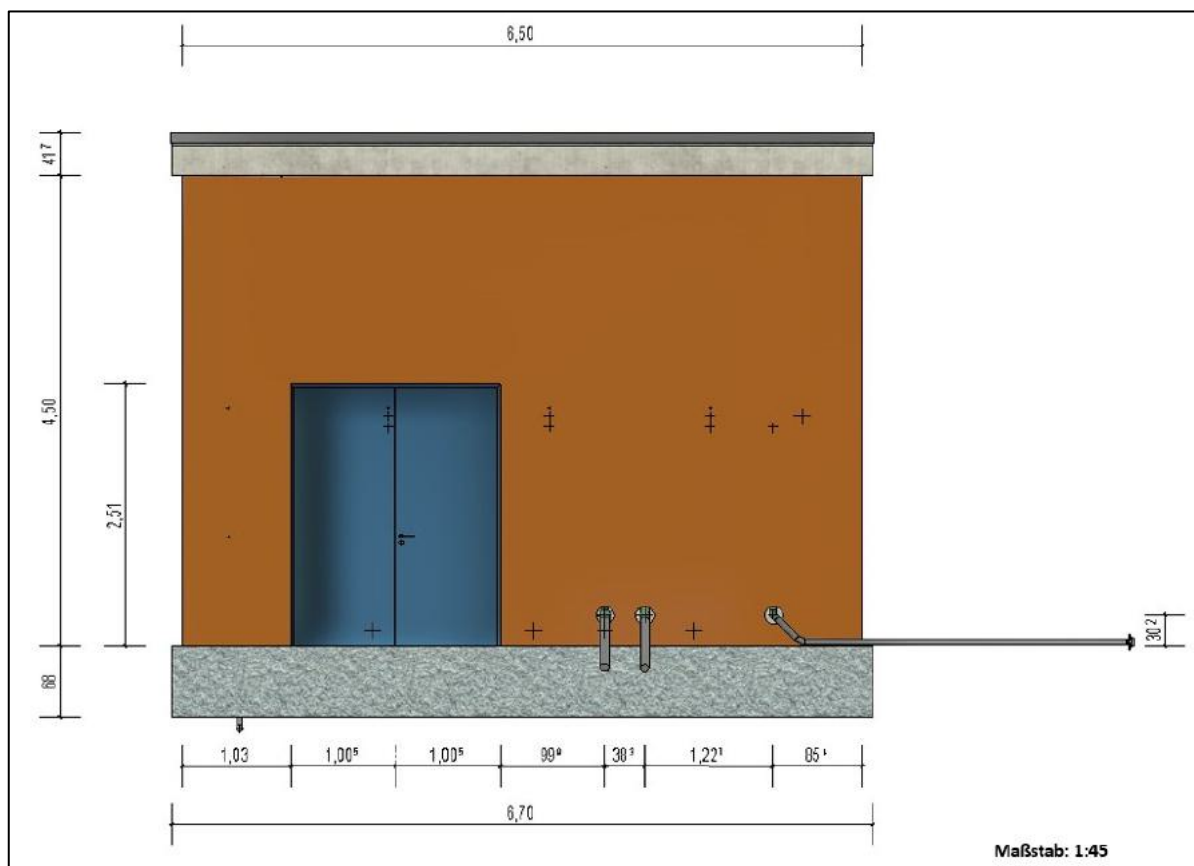


Abbildung 104: Seitenansicht West des Reservoirs mit Bemaßungen (eigene Darstellung)

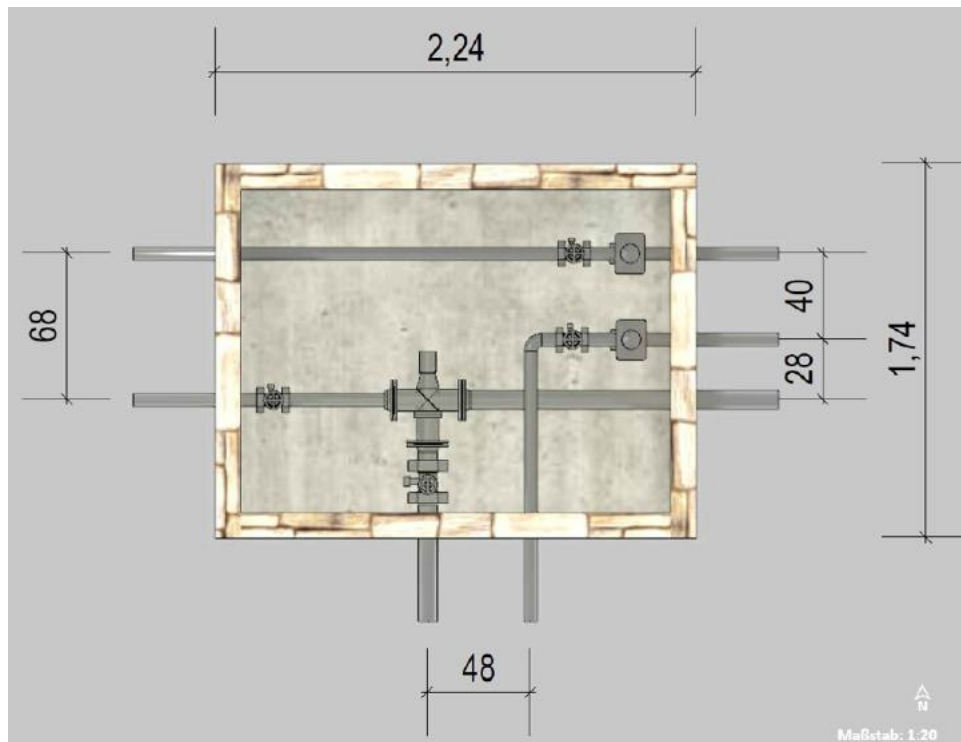


Abbildung 105: Grundriss des Sammelschachts mit Bemaßungen (eigene Darstellung)

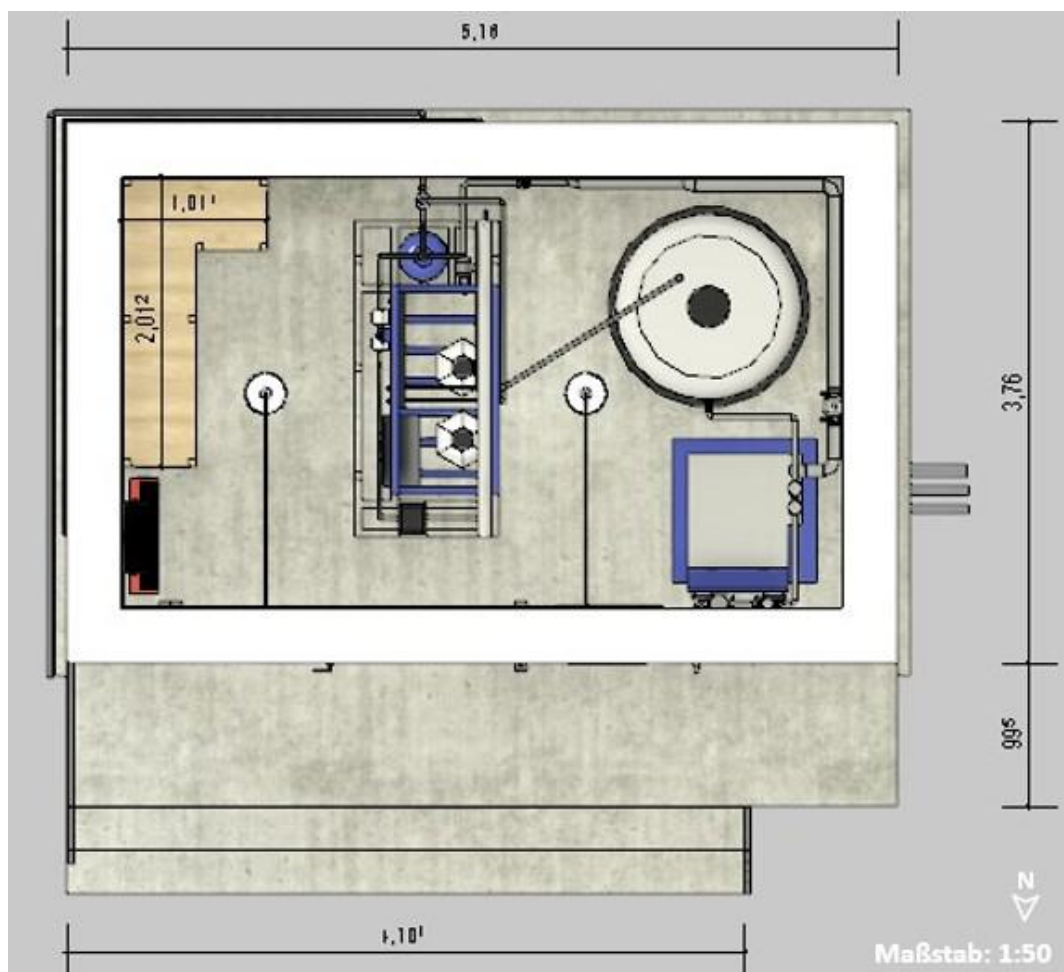


Abbildung 106: Grundriss des Gebäudes zur Wasseraufbereitung mit Bemaßungen (eigene Darstellung)

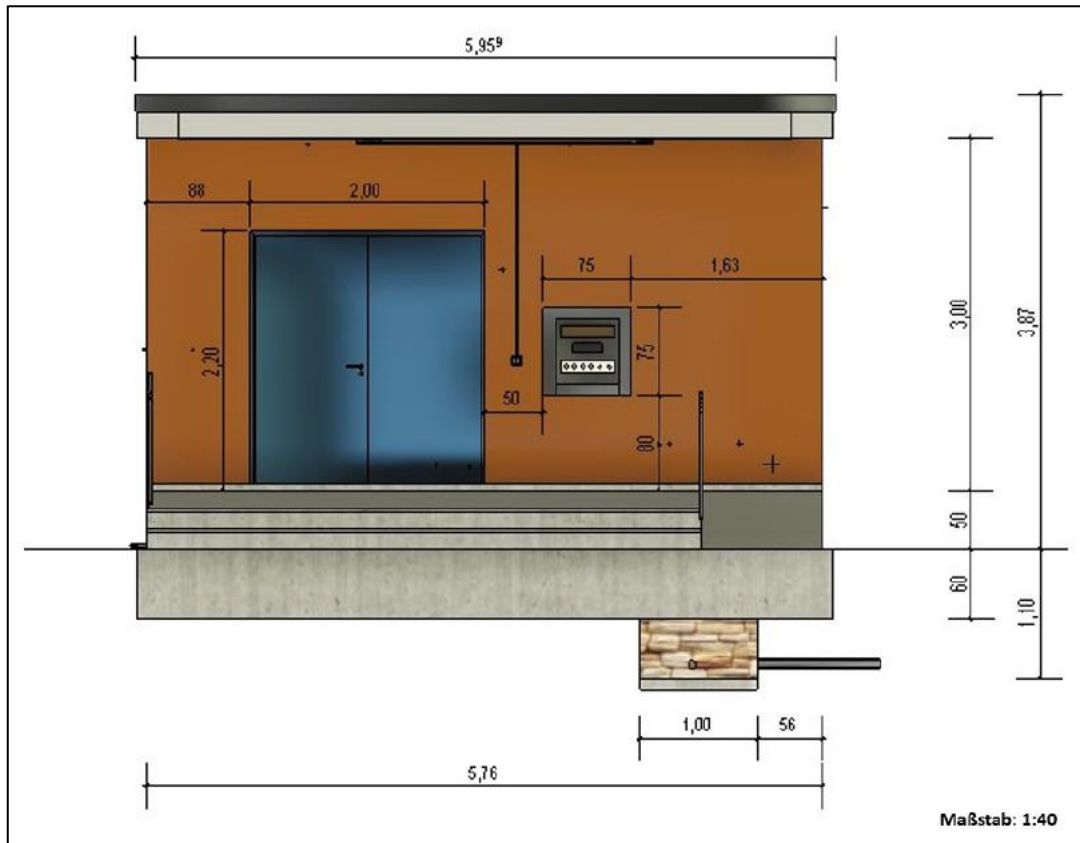


Abbildung 107: Seitenansicht Nord des Gebäudes zur Wasseraufbereitung mit Bemaßungen (eigene Darstellung)

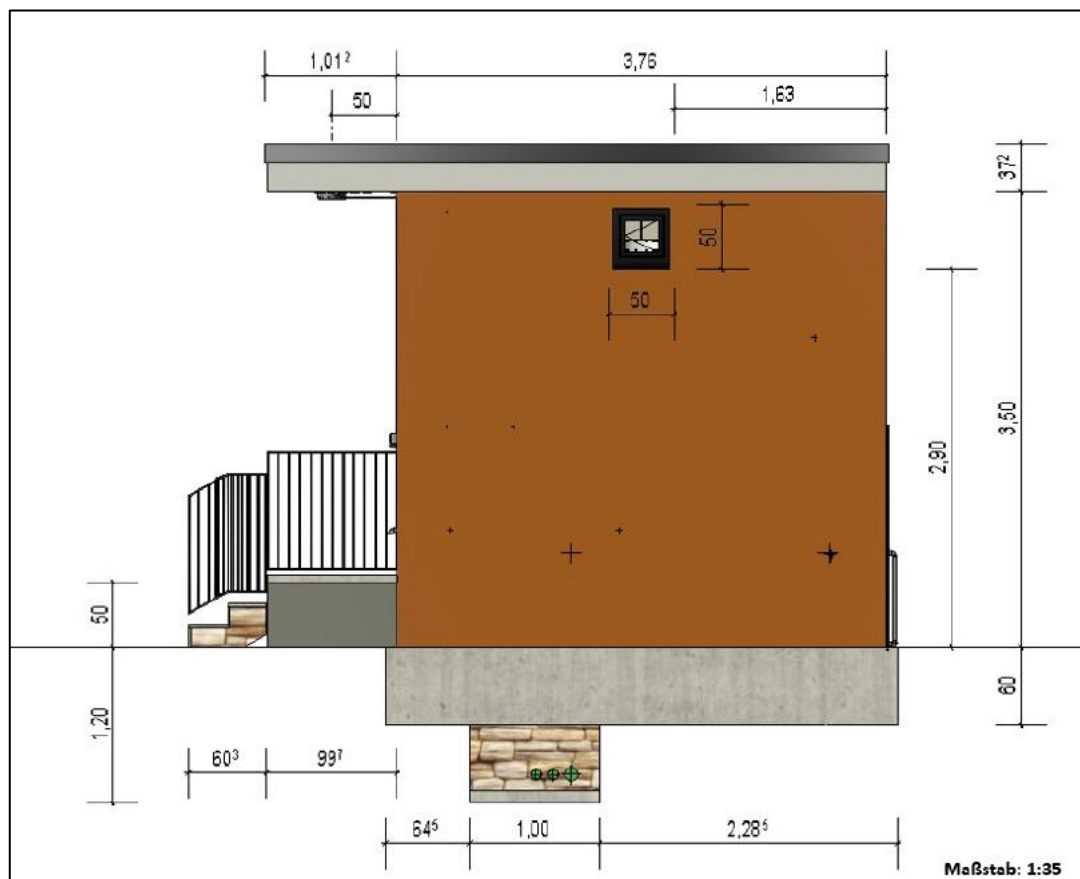


Abbildung 108: Seitenansicht West des Gebäudes zur Wasseraufbereitung mit Bemaßungen (eigene Darstellung)