

**Ursachen der sehr hohen Grundwasserstände
2012 und 2013 in Visp**

**Grundwasserproblematik Visp
Detailuntersuchung**

Auftrags-Nr. 31.4426.001
Bern, 20. Mai 2016 / Bia

Geotechnisches Institut

Aktiengesellschaft

Zertifiziert nach SN EN ISO 9001: 2008
Zertifikat Nr. CH7910708 / 16.07.2014

www.geo-online.com
info@geo-online.com

4002 Basel, Hochstrasse 48
2854 Bassecourt, Clos Girard 115
3027 Bern, Bümplizstrasse 15
2022 Bevaix, Rue du Collège 9
3900 Brig, Bahnhofstrasse 7
2740 Moutier, Rue des Prés
4500 Solothurn, Niklaus-Konrad-Str. 8
3700 Spiez, Postfach 474, Seestrasse 7

Tel.	061 365 28 00	Fax	061 365 23 79	info.bs@geo-online.com
Tel.	032 461 20 48	Fax	032 461 20 42	info.ju@geo-online.com
Tel.	031 389 34 11	Fax	031 381 31 15	info.be@geo-online.com
Tel.	032 846 24 61	Fax	032 846 24 63	info.ne@geo-online.com
Tel.	027 923 58 90	Fax	027 923 58 91	info.vs@geo-online.com
Tel.	032 493 40 43	Fax	032 493 40 44	info.ju@geo-online.com
Tel.	032 625 75 85	Fax	032 625 75 88	info.so@geo-online.com
Tel.	033 650 72 82	Fax	033 650 72 88	info.sp@geo-online.com

Inhaltsverzeichnis

Seite

I	Allgemeines	I
2	Einleitung	2
2.1	Veranlassung	2
2.2	Aufgabenstellung	2
2.3	Projektorganisation	3
2.4	Grundlagen	3
2.5	Verwendete Abkürzungen und Schreibweisen	4
3	Generelle Hinweise zur Methodik	5
3.1	Grundwassermessstellen und -messdaten	5
3.2	Referenz-Messstelle VH45 im Ortszentrum von Visp	5
3.3	Datensätze in digitaler Form (beigelegte CD)	6
3.4	Statistische Auswertungen	6
3.5	Numerisches Grundwassermodell	6
4	Hydrogeologische Verhältnisse im Raum Visp	8
4.1	Resümee	8
4.2	Zusammenschluss von zwei Grundwasservorkommen	8
4.3	Grundwasservorkommen Vispertal	9
4.4	Grundwasservorkommen Rhonetal	9
4.5	Grundwasserbilanz	10
4.6	Grundwasser-Schwankungen im Kontext der Aquifergeometrie	15

5	Die hohen Grundwasserstände von 2012/2013 im langjährigen Vergleich	18
5.1	Resümee	18
5.2	Langjähriger Jahresgang des Grundwassers im Raum Visp	18
5.3	Die Sommermaxima 2012/2013 im Ortszentrum von Visp im Vergleich zur Norm	19
5.4	Grundwasserstände im Vergleich zu den Pegelständen von Rhone und Vispa	21
5.4.1	Hochwasserereignisse	21
5.4.2	Kurzzeitige Abflussspitzen von Vispa und Rhone	21
5.4.3	Genereller Einfluss Rhone und Vispa aufs Schwankungsverhalten von VH45	23
5.5	Meteorologische Anomalie Anfang der 1980er Jahre	26
5.6	Abrupter Anstieg der GW-Stände beim Jahreswechsel 2011/2012	29
5.7	Winter-Grundwasserstände im Ortszentrum von Visp	31
6	Ursachen der sehr starken Grundwasser-Anstiege in den Jahren 2012/2013	34
6.1	Resümee	34
6.2	Verkettung von Ursachen und Wirkung	35
6.3	Fokussierung aufs Jahr 2012 und modelltechnisches Vorgehen	37
6.4	Reduzierte Entnahmen bei den Lonza-Fassungen	38
6.5	Unterirdische Zuflüsse aus dem umgebenden Festgestein	43
6.5.1	Genereller Überblick	43
6.5.2	Reaktion des Grundwassers auf Winterniederschläge	44
6.5.3	Einfluss der Schneeschmelze auf die Grundwasserschwankungen in Visp	47
6.5.4	Anteil der unterirdischen Bergwasserzuflüsse an den aussergewöhnlichen Grundwasseranstiegen von 2012 und 2013	53
6.6	Profilzufluss Lalden	53
6.7	Erhöhte Abflüsse von Vispa und Rhone	53

6.8	Zusammenfassung der massgebenden Prozesse, welche die GW-Anomalie 2012/2013 verursachten	55
7	Weitere Prozesse mit Einfluss aufs Schwankungsverhalten des Grundwassers	57
7.1	Profilzufluss Staldbach	57
7.2	Kanäle und Drainagen	57
7.3	Einbauten ins Grundwasser und andere Bautätigkeiten	57
7.3.1	Einbauten gemäss Inventar der Gemeinde Visp	57
7.3.2	Grossbaustellen im zeitlichen Kontext	58
8	Zukunftsprognosen und Empfehlungen zur Grundwasserbewirtschaftung im Raum Visp	59
8.1	Resümee	59
8.2	Intensivierung der Forschung „Prozesse der Gebirgs-GW-Neubildung und die Fortpflanzung von GW-Druckschwankungen im alpinen Raum“	59
8.3	Klimaveränderungen	59
8.4	Weiternutzung des numerischen Grundwassermodells	60
8.5	Abhängigkeit vom Entnahme-Regime der Lonza	61
8.6	Festlegung repräsentativer Bemessungswasserspiegel für Baubewilligungen	61
8.7	Sensibilisierung der Umweltbaubegleitungen von Grossbaustellen im Raum Visp	62
8.8	Zusammenarbeit zwischen der Gemeinde Visp und den kantonalen Fachstellen	62
9	Verzeichnis der zitierten Grundlagen	63

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Projektorganisation
Tabelle 2	Quellenangaben Datensätze
Tabelle 3	“Meilensteine“ der Grundwassermodellierung

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	GW-Messstellen
Abbildung 2	Strömungsverhältnisse des Grundwassers im Überblick
Abbildung 3	Perimeter für die Grundwasserbilanz mit schematischen Querprofilen
Abbildung 4	Grundwasserbilanz (Mittelwerte 2011-2012)
Abbildung 5	Änderung des GW-Spiegels: Kote Feb. 2012 minus Kote Feb. 2011
Abbildung 6	Differenzenpläne GW-Spiegel zu unterschiedlichen Zeitpunkten
Abbildung 7	Langjährige Periodizität der GW-Messstelle VH45
Abbildung 8	Detaildarstellung der Jahre 2011-2014 für VH45
Abbildung 9	Wasserpegel Vispa und Rhone im Vergleich zur Grundwasserganglinie von VH45
Abbildung 10	Reaktion des Grundwassers auf die Spitzenabflüsse 2013 (Tagesmittelwerte)
Abbildung 11	Ganglinien VH45, Vispa und Rhone im Überblick
Abbildung 12	Visualisierung des Konzepts „Glättung von Ganglinien mittels gleitender Mittel“
Abbildung 13	Langjährige Entwicklung der Winterniederschläge
Abbildung 14	Langjährige Periodizität der GW-Messstelle Im2: Visualisierung der Winterniederschlagsanomalie Anfang der 1980 Jahre
Abbildung 15	Visualisierung abrupter Anstieg der GW-Stände ab Ende 2011
Abbildung 16	Grundwasserstände Winter 2011/2012 im langjährigen Vergleich

- Abbildung 17 Modellsimulation unter Auslassung der direkten GW-Neubildung beim Jahreswechsel 2011/2012
- Abbildung 18 Visualisierung von Ursachen-Wirkungs-Zusammenhängen (Auswahl)
- Abbildung 19 Verschleppung und Glättung bei Signalübertragungen
- Abbildung 20 Fördermengen Fassungen Lonza, monatliche Durchschnittswerte
- Abbildung 21 Absenkrichter Fassungen Lonza
- Abbildung 22 Mittl. Fördermengen Monate Mai bis Juli und Ganglinie VH45 im Vergleich
- Abbildung 23 Postulierter Einflussbereich der Fassungen Lonza
- Abbildung 24 Ganglinie einer Messstelle ausserhalb des Einflussbereichs der Lonza-Fassungen
- Abbildung 25 Auswertung Niederschlagsdaten im Überblick
- Abbildung 26 Winterniederschläge im Vergleich zu den GW-Schwankungen von VH45 (Ortszentrum) und Q35 (Wereya)
- Abbildung 27 Berggrundwasser (hydrogeologisches Modell)
- Abbildung 28 Vergleich Schnee-Schmelzwasseranfall mit GW-Ganglinie VH45 (Visp)
- Abbildung 29 Vergleich Schnee-Schmelzwasseranfall mit GW-Ganglinie B80 (Brigerbad)
- Abbildung 30 Vergleich Schnee-Schmelzwasseranfall mit GW-Ganglinie B80 (Brigerbad), ohne Berücksichtigung von Schmelzwasserraten von > 80 mm/Tag
- Abbildung 31 Pegelstände Vispa und Grundwasser im Vergleich
- Abbildung 32 Prozesse, die im Ortszentrum von Visp zur Grundwasser-Anomalie 2012/2013 führten
- Abbildung 33 Gewichtung der Einflussfaktoren, die zum ungewöhnlichen GW-Anstieg führten, am Beispiel des Höchststandes Sommer 2012 im Ortszentrum von Visp
- Abbildung 34 Grundwasserrelevante Tätigkeiten bei Grossbaustellen im Raum Visp

Beilage (CD)

pdf Vorliegender Bericht: „Ursachen der sehr hohen Grundwasserstände 2012 und 2013 in Visp“, 20.5.2016
pdf Bericht Deltares: „Groundwater Flow Model Visp“, Oktober 2015

Rohdaten Hydrogeologie und Hydrologie (mehrere Dateien)

Verz. 1 Grundwasser
Verz. 2 Niederschlag und Schnee
Verz. 3 Fiessgewässer
Verz. 4 Entnahmen
Verz. 5 Modellergebnisse

**Ursachen der sehr hohen Grundwasserstände
2012 und 2013 in Visp
Grundwasserproblematik Visp, Detailuntersuchung**

I Allgemeines

Auftraggeber:	<u>Kanton Wallis</u> Departement für Verkehr, Bau und Umwelt Dienststelle für Umweltschutz Rue des Creusets 5 1950 Sion und <u>Gemeinde Visp</u> St. Martiniplatz 1 3930 Visp <u>Mit Partizipation folgender weiterer kantonaler Dienststellen:</u> Dienststelle für Strassen, Verkehr und Flussbau; Hochwasser- schutz Dienststelle für Strassen, Verkehr und Flussbau; Kantonsgeolo- gie Amt für Nationalstrassenbau
Datenbereitstellung, wissenschaftliche Un- terstützung:	CREALP Centre de recherche sur l'environnement alpin 1951 Sion
Teilauftrag Grundwasser- Modellierung	Deltares Section Groundwater Management Princetonlaan 6 3508 Utrecht, The Netherlands
Auftragserteilung:	Kanton Wallis, DUS, Sektion Gewässerschutz: Offizielle Mitteilung „Grundwasserproblematik Visp – Detailuntersuchung“ vom 28. November 2013.

2 Einleitung

2.1 Veranlassung

„Die Visper stehen im Wasser - Am Anfang wurden nur die Keller feucht, dann drang das Wasser sogar in Tiefgaragen ein. Inzwischen haben Dutzende Keller in Visp dasselbe Problem: Grundwasser dringt ein.“ Dies der Auszug aus einem Presseartikel der Roten Anneliese von August 2013.

Was geschah? Im ersten Halbjahr 2012 stiegen die Grundwasserstände im Raum Visp ungewöhnlich stark an. Im Ortszentrum überschritten die Sommer-Pegelstände alle bisher gemessenen Werte. Der Maximalstand vom 7. Juli 2012 lag 1.10 Meter über der regulären Sommerwasserkote. Grundwasser drang in Kellergeschosse und Tiefgaragen ein. Im darauffolgenden Jahr wiederholte sich diese „Schwankungsanomalie“. Die Spitze wurde am 22./23. Juni 2013 gemessen. 2014 normalisierte sich die Situation wieder.

Fachleute machten unterschiedliche Gründe für diese aussergewöhnlich hohen Grundwasserstände geltend: In einer ersten Reaktion wurden Arbeiten für die 3. Rhonekorrektur verantwortlich gemacht. Der Kanton beauftragte daraufhin das Büro Rovina und Partner AG für eine erste hydrogeologische Ursachenanalyse. Im entsprechenden Gutachten vom 26.06.2013 [1] gelangen die Autoren zu folgenden Ergebnissen:

Die Ganglinienanalysen zeigen, dass die Arbeiten an der Rhone als Verursacherin der ungewöhnlichen Grundwasseranstiege ausgeschlossen werden können. Mit grosser Wahrscheinlichkeit sei die Hauptursache im hohen Zufluss aus dem Vispertal zu suchen. Dieser Zufluss könne folgende Gründe haben:

- 1) Karstwasserinfiltrationen aus den triadischen Gesteinen in den Lockergesteinsgrundwasserleiter oberhalb Katzenhaus.
- 2) Gesteigerte Vispa-Infiltrate durch Aufräuen der Flusssohle.

Die Gemeinde Visp und die kantonalen Fachstellen kamen überein, die hydrogeologischen Verhältnisse detaillierter untersuchen zu lassen. Der vorliegende Bericht zeigt die Ergebnisse dieser Detailuntersuchung auf.

2.2 Aufgabenstellung

Die Detailuntersuchung „Grundwasserproblematik Visp“ soll aufzeigen, weshalb in den Jahren 2012 und 2013 ausserordentlich starke Anstiege der Grundwasserstände vorlagen [2]. Damit einhergehend gilt es, die Grundwasserzuflüsse und –wegflüsse vertieft zu analysieren sowie die Dynamik des natürlichen Schwankungsverhaltens und die anthropogenen Einflüsse auf die Grundwasserstände zu untersuchen. Insbesondere sollen die Strömungsverhältnisse mittels eines instationären, numerischen 3D-Modells nachgebildet werden.

2.3 Projektorganisation

Die Federführung der Untersuchungen oblag der Dienststelle für Umweltschutz (DUS) des Departementes für Verkehr, Bau und Umwelt des Kantons Wallis. Mitbeteiligt waren ferner die Gemeinde Visp sowie die kantonalen Stellen DSVF (Rhoneprojekt und Kantonsgeologie) sowie ANSB (Autobahn A9). Das Forschungszentrum CREALP unterstützte das Projekt bei der Gewinnung von Daten und bei wissenschaftlichen Fragestellungen. Die operative Leitung übernahm die Firma Geotechnisches Institut AG und für die Grundwassermodellierung wurde die Firma Deltares beauftragt.

Aufgabe, Funktion	Stelle, Büro	Personen
Projektleitung Auftraggeber	Dienststelle für Umweltschutz, DUS, Kt. VS	Pierre Christe
Erweiterte Projektleitung Auftraggeber	Gde. Visp, Infrastruktur & Umwelt	Norbert Zuber
	Sektion Hochwasserschutz Rhone, Kt. VS	Alexandre Vogel
	Amt für Nationalstrassenbau, Kt. VS	Marc-Antoine Robyr
	Kantonsgeologie (Sektion Hydrologie – Hydrogeologie – Geologie)	Philippe Gsponer
	CREALP, Kt. VS ¹	Pascal Ornstein
Operative Projektbearbeitung	Geotechnisches Institut AG, Bern	Daniele Biaggi (leitender Experte) Joëlle Mayoraz Florian Zurfluh
Numerische Grundwassermodellierung	Deltares, Utrecht	Peter Vermeulen

Tabelle I Projektorganisation

Projektsitzungen fanden halbjährlich statt. Die zu diskutierenden Zwischenergebnisse wurden den Beteiligten jeweils in Form von Aktennotizen vorgängig zugestellt. Besprechungen fanden an folgenden Daten statt:

- 12.11.2013 (DUS, Sitten)
- 12.05.2014 (DUS, Sitten)
- 16.10.2014 (DUS, Sitten)
- 21./22.05.2015 (Deltares, Utrecht)
- 07.07.2015 (DUS, Sitten)
- 22.12.2015 (DUS, Sitten)
- 22.03.2016 (DUS, Sitten)

2.4 Grundlagen

Berichte und Grundlagenliteratur sind im vorliegenden Bericht zitiert. Das entsprechende Verzeichnis findet sich in Kapitel 9. Demgegenüber verzichten wir, verwendete Daten-

¹ Datengewinnung und wissenschaftliche Unterstützung

sätze im Lauftext explizit zu zitieren. Die Datenquellen der geologischen, hydrogeologischen, hydrologischen und meteorologischen Daten sind nachfolgend dargelegt:

Thema	Datensatz	Datenquelle
Geologische Bohrprofile	Einzelprofile	CREALP, DUS
Grundwasserstände	Kantonale GW-Messstellen	CREALP
	Trinkwasserfassungen Gde. Visp	Brunnenmeister Gde. Visp
	Projekt-Messstellen (Rhonekorrektur)	Sektion Hochwasserschutz Rhone
Fördermengen	Trinkwasserfassungen Gde. Visp	Brunnenmeister Gde. Visp
	Brauchwasserfassungen Lonza	Lonza AG, Visp
	Übrige Brauchwasserfassungen (Konzessionswassermengen)	Brunnenmeister Gde. Visp
Einbauten ins Grundwasser	Bauten mit zwei und mehr Untergeschossen	Gde. Visp Abt. Infrastruktur & Umwelt
Daten Rhone und Vispa	Abflussdaten und Pegelstände (Stationen Brig und Visp)	BAFU
	Sohlenprofile (Quer- und Längsprofile)	BAFU
Niederschlagsdaten	Diverse Stationen Talebene und Seitentäler	MeteoSchweiz
Schneedaten	Snow-Water-Equivalent Diverse Stationen im Einzugsgebiet der Vispa	WSL, CREALP

Tabelle 2 Quellenangaben Datensätze

2.5 Verwendete Abkürzungen und Schreibweisen

CREALP	Centre de recherche sur l'environnement alpin, Sion
DUS	Dienststelle für Umweltschutz, Kantons Wallis
Gde.	Gemeinde
GW	Grundwasser
Hohbrunnen	Hohbrunn, Hohbrunne (Trinkwasserfassung Gde. Visp)
Katzenhaus	Chatzuhüs (Trinkwasserfassung Gde. Visp)
Kt.	Kanton (auch im Sinne von kantonaler Dienststelle)
PW	Pumpwerk (Grundwasserfassung)
REGIS	Kantonale Geodatenbank für die GW-Bewirtschaftung
Rhone	Rhône, Rotten, Rottu
SWE	Snow Water Equivalent (Schneewasseräquivalent)
TW	Trinkwasser
Wereya	Wereiya
WSL	Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft

3 Generelle Hinweise zur Methodik

3.1 Grundwassermessstellen und -messdaten

Im Untersuchungsperimeter liegt ein dichtes Netz an Grundwassermessstellen vor (ausser im Vispertal zwischen dem Ortszentrum und der Trinkwasserfassung Hohbrunnen). Die Messstellen lassen sich mit Blick auf die Datenerfassung in zwei Typen unterteilen:

Einzelmessungen:

Periodische Abstichmessungen mit unterschiedlichen Zeitintervallen. In der Regel monatliche bis halbjährliche Messungen.

Kontinuierliche Datenerfassung:

Mit Loggern ausgestattete Messstellen, wobei in der Regel auch Einzelmesswerte aus der Zeitperiode vor dem Loggereinbau vorliegen.

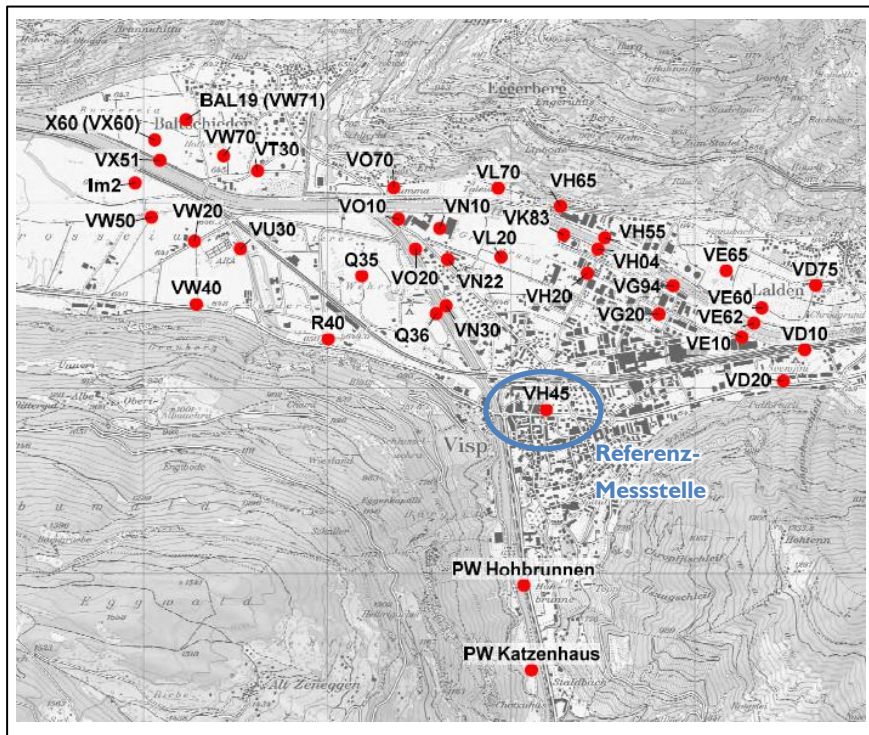


Abbildung I GW-Messstellen

Datenbasis:

Auszug aus der kantonalen hydrogeologischen Datenbank (REGIS)

3.2 Referenz-Messstelle VH45 im Ortszentrum von Visp

Um die Ursachen der markanten Grundwasseranstiege in den Sommermonaten 2012 und 2013 ermitteln zu können, fokussieren sich statistische Berechnungen und Modellsimulationen auf das Verhalten der Messstelle VH45. Sie wird im vorliegenden Bericht als „Referenz-Messstelle“ betrachtet, welche die Grundwasserverhältnisse im Ortszentrum widerspiegelt.

Detailangaben zu VH45:

Koordinaten:	634'193/126'885
Adresse:	Bahnhofstrasse, Visp
Datensätze GW-Stände:	Jan. 1989 – Aug. 1992: Einzelmessungen, i.d.R. monatlich Jan. 1993 – Juli 2005: Einzelmessungen, i.d.R. halbjährlich Ab 29.07.2005: Kontinuierliche Messungen (Logger)
GW-Stände:	Langjähriges Mittel: 642.81 m ü. M. Max. seit Messbeginn: 645.11 m ü. M. (7./8. Juli 2012) Min. seit Messbeginn: 640.55 m ü. M. (17. März 1992)

3.3 Datensätze in digitaler Form (beigelegte CD)

Die Datensätze, welche für statistische Auswertungen bzw. für den Aufbau und die Kalibrierung des numerischen Grundwassermodells verwendet wurden, sind in Form von Exceldateien auf dem beiliegenden Datenträger abgespeichert.

3.4 Statistische Auswertungen

Die statistischen Auswertungen umfassen hydrogeologische Ganglinienauswertungen zur Visualisierung von Perioden mit Grundwasserüberschüssen und Grundwasserdefiziten sowie Korrelationsanalysen basierend auf linearer Regression. Im Detail sind die statistischen Auswertungen in den Aktennotizen erläutert, welche dem Projektteam als Sitzungsunterlagen zugestellt wurden ([3], [4], [5], [6]).

3.5 Numerisches Grundwassermodell

Die Verantwortung fürs „Teilmandat Grundwassermodellierung“ oblag der Firma Deltares in Utrecht. Zur Erstellung des instationären, dreidimensionalen Modells kam die Software iMOD zur Anwendung [7]. Der Modellperimeter umfasst das Grundwasservorkommen Vispertal ab Staldbach sowie das Grundwasservorkommen Rhonetal zwischen Lalden und Steineye. Der westliche Modellrand wurde bewusst rund 4 km im Abstrom von Visp gewählt. Dadurch sollen allfällige Rückflüsse entlang des Festpotenzialrands bei hohen Pumpenleistungen der Brauchwasserfassungen Lonza verhindert werden. An die Kalibrierungsgüte wurde jedoch – um den Optimierungsaufwand in Grenzen halten zu können – fürs Teilgebiet zwischen Baltschieder und Steineye keine hohen Anforderungen gestellt. Die instationäre Modellberechnung umfasst die Zeitperiode vom 1.2.2011 bis 31.12.2013².

Modellaufbau und Ergebnisse sind im beiliegenden Bericht [8] dokumentiert. Die Arbeiten erfolgten in enger Begleitung durch den Projektleiter des Auftraggebers und durch das Geotechnische Institut. Tabelle 3 fasst die „Meilensteine“ der Modellierung zusammen.

² Ursprünglich war vorgesehen, mit dem instationären Modell drei Kalenderjahre abzudecken. Da aber für den Januar 2011 die Fördermengen der einzelnen Lonza-Fassungen fehlen, beginnen die numerischen Berechnungen per Februar 2011.

Datum	(Zwischen-)Ergebnis, Tätigkeit	Ref.
27.1.2015	Modellkonzept	[9]
21./22.5.2015	Besprechung erste Zwischenergebnisse, Modelloptimierungen und Sensitivitätsanalysen. Beschlüsse zum definitiven Modellaufbau.	[10]
20.7.2015	Erster kompletter Datensatz mit Ergebnissen zur Qualitätskontrolle	
19.8.2015	Revidierter Datensatz mit Ergebnissen nach erfolgter Qualitätskontrolle	
1.9.2015	Ergänzende Simulationen (6 Szenarien)	
16.9.2015	Ergänzende Simulationen (2 Szenarien)	
25.9.2015	Berichtsentwurf Deltares	
Okt. 2015	Definitiver Bericht Deltares	[8]
2.2.2016	Ergänzende Simulation (1 Szenario)	[11]

Tabelle 3 “Meilensteine“ der Grundwassermodellierung

iMOD ist ein open-source-Code, welcher Interessenten kostenlos zur Verfügung steht. Der gesamte Datensatz des Grundwassermodells Visp wurde der kantonalen Dienststelle für Umweltschutz (DUS) übergeben und kann somit räumlich und/oder zeitlich erweitert bzw. für Berechnungen weiterer Szenarien verwendet werden.

4 Hydrogeologische Verhältnisse im Raum Visp

4.1 Resümee

Die hydrogeologischen Verhältnisse im Raum Visp zeichnen sich durch zwei Besonderheiten aus. Erstens treffen hier zwei Grundwasservorkommen, namentlich dasjenige des Vispertals und dasjenige des Rhonetals zusammen. Die beiden Aquifere weisen unterschiedliche Geometrien auf. Zweitens wird das Grundwasser stark genutzt. Die Fördermengen industrieller Brauchwasserfassungen machen fast die Hälfte des gesamten Grundwasserumsatzes aus. Das Ortszentrum von Visp liegt im Einflussbereich der entsprechenden Absenktrichter.

Gespeist wird das Grundwasser im Raum Visp in erster Linie durch den Profilzufluss bei Lalden (Systemgrenze des Betrachtungsperimeters), durch Infiltrate aus Rhone und Vispa sowie durch unterirdische Bergwasserzuflüsse.

Die speziellen geometrischen Verhältnisse führen dazu, dass Variationen „linearer“ Zuflüsse, welche das gesamte Grundwassergebiet betreffen, im oberen Vispertal ausgeprägtere Spiegelschwankungen hervorrufen.

4.2 Zusammenschluss von zwei Grundwasservorkommen

Im Raum Visp vereinigt sich das Grundwasservorkommen des Vispertals mit demjenigen des Rhonetals. Während das Grundwasser im Vispertal von Süd nach Nord strömt, weist es im Rhonetal eine von Ost nach West verlaufende Fliessrichtung auf. Im Ortszentrum von Visp kommt es deshalb zu einer kurvenartigen Umlenkung der Strömungsrichtung, die ausserdem durch die Entnahmen im Raum Sandmatten (Fassungen Lonza) beeinflusst wird.

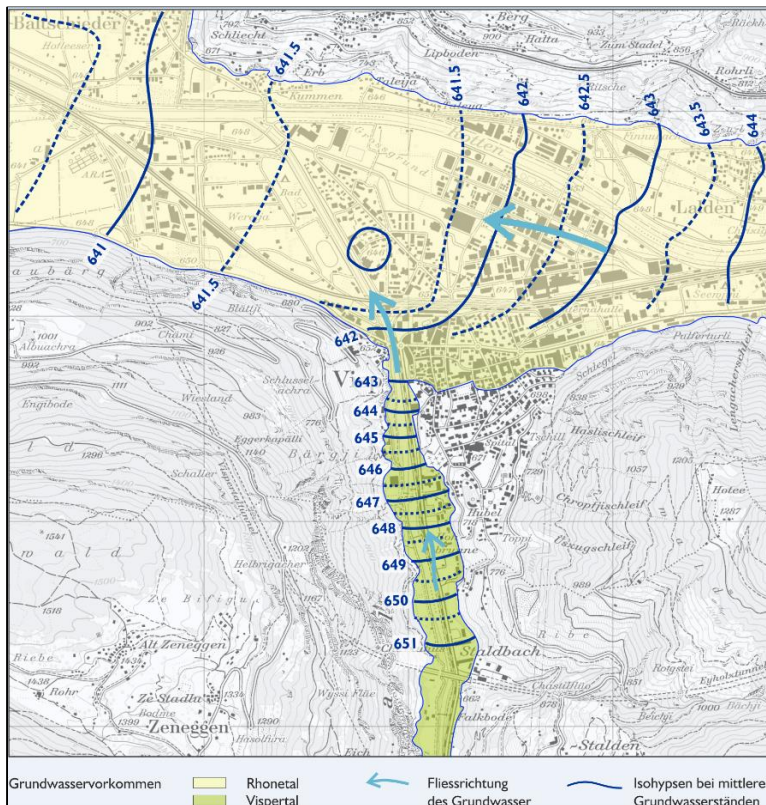


Abbildung 2 Strömungsverhältnisse des Grundwassers im Überblick

4.3 Grundwasservorkommen Vispertal

Das Vispertal stellt ein schmales, im Vergleich zum Rhonetal wenig ergiebiges Grundwasservorkommen dar. In Katzenhaus und Hohbrunnen befinden sich die beiden Trinkwasserfassungen der Gemeinde Visp. Der Aquifer besteht aus nacheiszeitlichen, fluviatilen Schottern [12]. Überkonsolidierte Moränen bilden den Stauer. Die mittlere Grundwassermächtigkeit beläuft sich beim Vertikalfilterbrunnen Katzenhaus auf mindestens 25 m [13].

4.4 Grundwasservorkommen Rhonetal

Zahlreiche Bohrungen gewährleisteten einen hohen Kenntnisstand der Grundwasserverhältnisse im Rhonetal. Im Raum Visp handelt es sich um einen geschichteten Lockergesteinsaquifer. Insgesamt konnten je nach Standort zwischen zwei und vier grundwasserführende Stockwerke ausgemacht werden, die durch geringdurchlässige Zwischenschichten voneinander getrennt sind (z.B. [8], [14]).

Aus Sicht der Grundwasserbewirtschaftung sind die oberflächennahen wasserführenden Schichten relevant. Diese werden an mehreren Fassungsstandorten genutzt. Teils handelt es sich um zwei durch geringdurchlässige Feinsande getrennte Stockwerke, teils um einen einzelnen, zusammenhängenden Grundwasserträger. Die Gesamtmächtigkeit dieses

aus fluviatilen Kiessanden bestehenden, oberflächennahen Aquiferbereichs beläuft sich auf 5 bis 15 m.

Über die Zusammensetzung und die hydrogeologischen Verhältnisse der tiefer liegenden Trogfüllungen im Raum Visp liegen momentan nur wenige Informationen vor. Wir verweisen auf zwei laufende Forschungsprojekte.

COGEAR-Projekt: COGEAR ist ein interdisziplinäres Forschungsprojekt der ETH Zürich, das sich der Verkettung von Naturereignissen widmet, die durch Erdbeben ausgelöst werden [15]. Unter anderem wurde der tiefere Untergrund nördlich des Ortszentrums von Visp (Grossgrund) mittels zwei Bohrungen erkundet³. Beide Bohrungen mussten auf einer Tiefe von gut 100 m aufgrund starker subthormaler Wasserzuflüssen eingestellt werden. Grundwasserführende, kiesige Ablagerungen wurden in folgenden Tiefen angetroffen [16]:

- 12 – 16 m, Temp. 8.7°C
- 26 – 34 m, Temp. 8.6°C
- 42 – 96 m, Temp. 9.2 bis 11.0°C
- 96 – 102 m, Temp. 18.0°C

GeoQuat-Projekt: Im Rahmen von GeoQuat wird während der Projektdauer von drei Jahren (2014 – 2017) ein Informationssystem der quartären Lockergesteine in der Schweiz aufgebaut. Dies beinhaltet die Schaffung einer Infrastruktur zur strukturierten, zentralen Verwaltung von quartären Lockergesteinsdaten unter Berücksichtigung der bestehenden Nutzungen (Hydrogeologie, Geotechnik, Geothermie, mineralische Rohstoffe und seismische Mikrozonierung). Dabei werden für vier ausgeschiedene Pilotregionen die verfügbaren Lockergesteins-Daten erfasst und interpretiert. Mit Hilfe der erfassten Daten folgt im Anschluss die Realisierung geologischer 3D-Modelle (Quartärgeologisches Basismodell und Parameter-Modelle, z.B. hydraulische Durchlässigkeit). In der Region Visp – welche eine der Pilotregionen darstellt – liegt der Fokus im Bereich der Hydrogeologie sowie in der seismischen Mikrozonierung [17].

4.5 Grundwasserbilanz

Die Bilanzierung der Zu- und Wegflüsse beruht auf den Ergebnissen der numerischen Grundwassermodellierung. Um repräsentative Durchschnittswerte zu erlangen, wurden die instationären Daten der Jahre 2011 mit eher tiefen Grundwasserständen und 2012

³ Koordinaten: Bohrung F4 633'801/127'747, Bohrung 633'811/127'781

mit hohen Grundwasserständen berücksichtigt. Im Gegensatz zu dem in [8] dargestellten Modellperimeter, dessen abstromige Begrenzung im Gebiet Steineye liegt, beschränkt sich die hier aufgeführte Bilanzierung bis in den Bereich Wereya (vgl. Abbildung 3). Das Ergebnis der Bilanzierung ist in Abbildung 4 dargestellt. Der Gesamtumsatz beläuft sich auf rund 400 l/s ($\approx 24'000$ l/min).

Erläuterungen zu den Bilanzkennziffern:

Profilzuflüsse und Profilwegfluss:	Die Profilzuflüsse Staldbach (Vispertal) und Lalden (Rhonetal) sowie der Profilwegfluss im Westen sind im Modell als Festpotenzialränder mit zeitlich variierenden Grundwasserständen definiert. Sie stellen die Systemgrenzen dar.
Infiltrationen und Exfiltrationen:	<p>Die Infiltrations- und Exfiltrationsmengen Vispa und Rhone ergeben sich aus der so genannten „Leakage-Beziehung“, welche den Wasserstand des Oberflächengewässers, die Tiefenlage der Sohle, den hydraulischen Widerstand der Kolmatierungsschicht und den Grundwasserstand des umliegenden Aquiferbereichs berücksichtigt.</p> <p>Die durchschnittliche Infiltrationsleistung der Rhone von 35 l/s pro Laufkilometer⁴ fällt im Vergleich zu Infiltrationsleistungen anderer grosser Fliessgewässer in der Schweiz relativ moderat aus. Der Grund liegt darin, dass die Rhone im Raum Visp meist in geringdurchlässigen Deckschichten eingebettet ist. Nennenswerte Exfiltrationen finden innerhalb des Betrachtungsperimeters nicht statt.</p> <p>Auch die Vispa weist mit durchschnittlich 18 l/s pro Laufkilometer eine relativ bescheidene Infiltrationsleistung auf. Örtlich kann die Infiltration aufgrund der Kolmatierung praktisch ganz wegfallen. Hydrochemische Untersuchungen bei der Fassung Katzenhaus zeigen, dass der Einfluss der Vispa zumindest in diesem Gebiet sehr gering ausfällt [12].</p>
Unterirdische Zuflüsse aus dem umgebenden Festgestein:	<p>Die Speisung aus den umgebenden Festgesteinen (Felsuntergrund) geht als Input-Daten ins Modell ein. Hierbei werden diese unterirdischen Zuflüsse zweigeteilt:</p> <p>1) <i>Input als Seitenzuflüsse entlang Modellrändern</i> Statistische Auswertungen machen eine Korrelation des Schwankungsverhaltens dieser Zuflüsse mit dem Verhalten der Schneeschmelze (als Folge der Winterniederschläge) deutlich. Das „Herantasten“ an plausible Mengen erfordert ein iteratives Vorgehen. Im Mittel gehen wir davon aus, dass diese rund 40 Prozent des im orographischen Einzugsgebiet anfallenden Niederschlagswasser be-</p>

⁴ Berechnet aufgrund der Modellergebnisse

tragen. Die zeitabhängige Verteilung folgt den kumulierten Schneewasseräquivalenten über ca. 200 Tage.

- 2) *Input als Flächenzuflüsse im Basis-Layer Rhonetal*
Potenzialdrücke und erhöhte Grundwassertemperaturen in tief reichenden Bohrungen im Rhonetal zeigen, dass mit einem Aufsteigen von basalem Tiefengrundwasser zu rechnen ist. Als Schätzwert wurde fürs Grundwasservorkommen Rhonetal ein konstanter Wert von 0.5 mm/Tag angenommen.

Vertikal versickerndes Niederschlagswasser:

Die Berechnung der so genannten „direkten Grundwasserneubildung“ beruht auf den in der Talebene anfallenden Niederschlagsmengen. Die Signalverschleppung und Glättung dieser Zuflüsse wird durch gleitende Mittel über 5 Tage gebildet. Der Infiltrationskoeffizient variiert in Abhängigkeit der Evapotranspiration: Der maximale Koeffizient ist im Dezember (80% des Niederschlags), der minimale Koeffizient in den Monaten Juni bis August (5%) zu verzeichnen.

Entnahmen:

Brauchwasserfassungen Lonza

Die Lonza nutzt das Grundwasser des Rhonetals an vier Standorten (Brunnen „Nord 83“, „Sandmatten Nord“, „Sandmatten Süd“, „Sandmatten B1“). Für den modellierten Zeitraum (01.02.2011 – 31.12.2013) liegen Tagesfördermengen der Einzelbrunnen vor.

Trinkwasserfassungen der Gde. Visp

Im Vispertal befinden sich die beiden Trinkwasserfassungen Katzenhaus und Hohbrunnen. Das Pumpregime weist starke saisonale Fluktuationen auf. Für beide Brunnen werden messtechnisch die Monatssummen erfasst.

Übrige Entnahmen

Von den übrigen Fassungen liegen ausschliesslich die Konzessionswassermengen vor. Da es sich vorwiegend um landwirtschaftliche Grundwassernutzungen handelt, wurde als realistische Fördermenge die Konzessionswassermenge halbiert, und diese reduzierte Leistung ausschliesslich in den Wachstumsmonaten Mai bis Juli im Modell implementiert.

Güte der Grundwasserbilanzierung:

Das Grundwassermodell Visp weist in seiner Grundstruktur einen regionalen Charakter auf. Die räumliche Diskretisierung sowohl von geometrischen Verhältnissen als auch von einzelnen Prozessen berücksichtigen keine kleinräumigen, lokalen Variationen. Letztlich basiert das Modell auf einem unter den Projektbeteiligten gemeinsam abgestimmten Datenbestand. Damit einhergehende Unsicherheiten und Vereinfachungen widerspiegeln sich in der Güte der dargestellten Grundwasserbilanz.

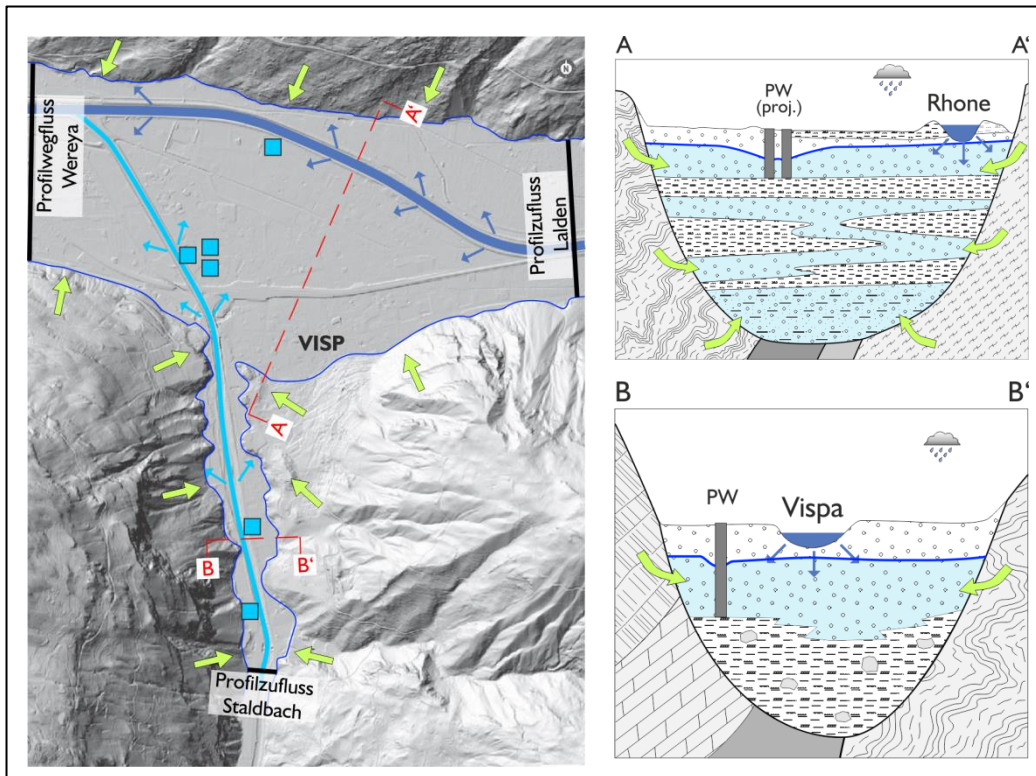


Abbildung 3 Perimeter für die Grundwasserbilanz mit schematischen Querprofilen

Erläuterungen:

Die beiden Querprofile verstehen sich als schematische Darstellungen und sind nicht massstabsgetreu.

Profil A-A': Die Tiefenlage des Felsuntergrund des mit quartären Lockergesteinen gefüllten Trops wird aufgrund gravimetrischer Modellierungen [18] wie folgt geschätzt:

- Nordöstlich von Visp: 330 m
- Südlich von Baltschieder: 440 m

Profil B-B': Die Mächtigkeit der Lockergesteinsfüllung ist fürs Gebiet der beiden Fassungen Hohbrunnen und Katzenhaus nicht bekannt [19]. Beim Filterbrunnen Katzenhaus treten ab ca. 30 m stark verfestigte und dicht gelagerte siltige Kiese bzw. siltige Sande mit Steinen und Blöcken zutage (Moräne?) [13].

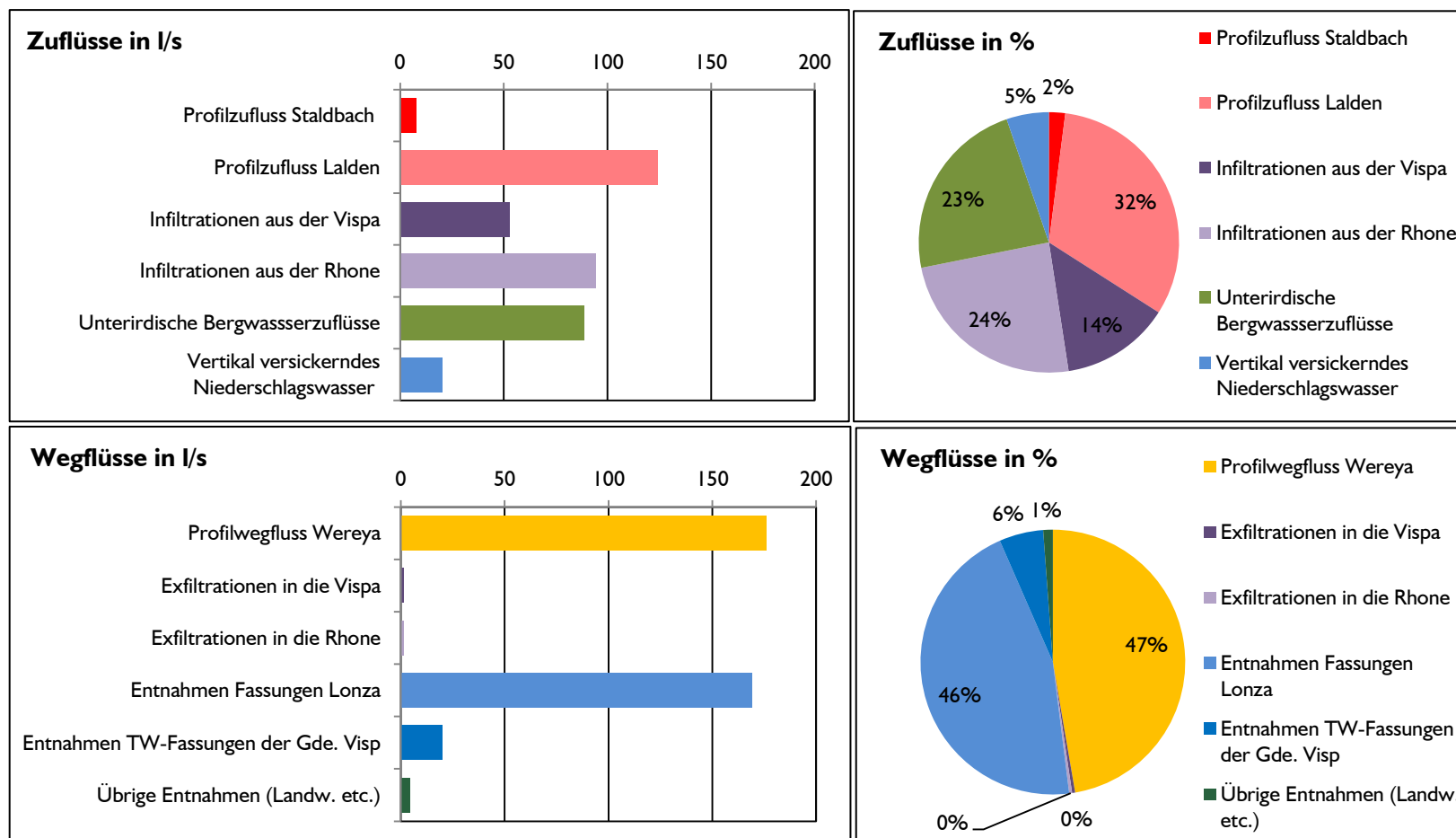


Abbildung 4 Grundwasserbilanz (Mittelwerte 2011-2012)

4.6 Grundwasser-Schwankungen im Kontext der Aquifergeometrie

Das Schwankungsverhalten wird im Detail in Kapitel 5 diskutiert. Der vorliegende Abschnitt beschränkt sich auf die Differenzen zwischen zwei zu unterschiedlichen Zeitpunkten gemessenen Grundwasserspiegeln.

In [1] werden die Differenzen der Grundwasserstände zwischen Februar 2011 und Februar 2012 aufgezeigt (vgl. Abbildung 5).

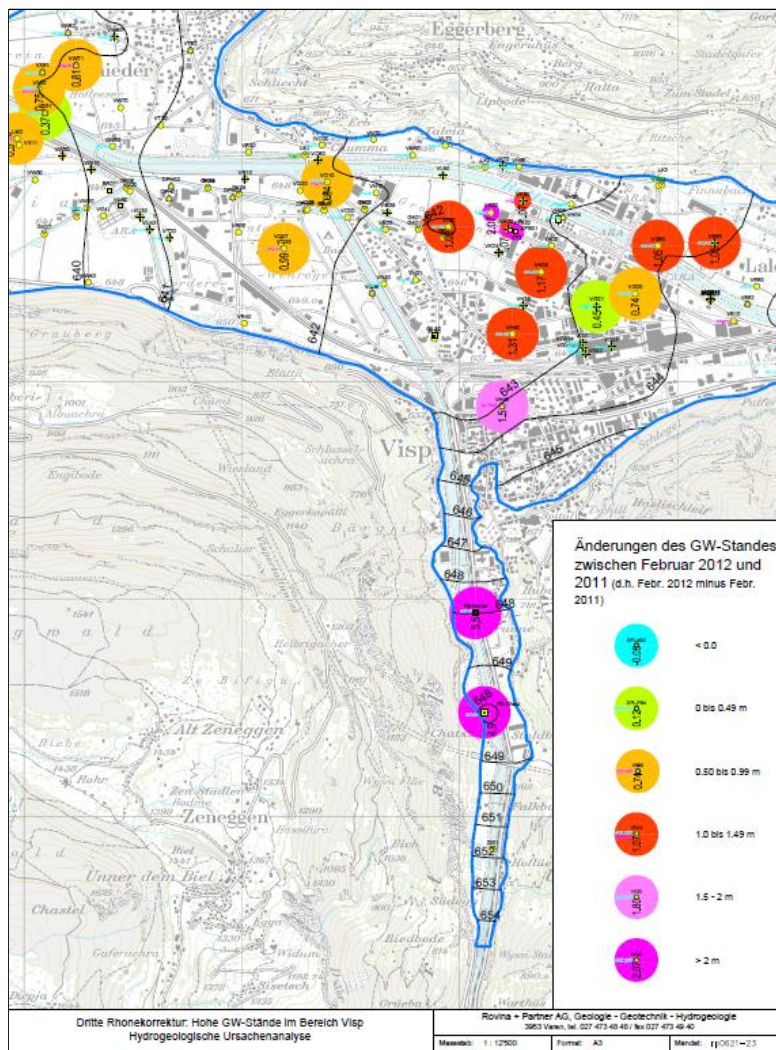


Abbildung 5 Änderung des GW-Spiegels: Kote Feb. 2012 minus Kote Feb. 2011

Quelle:

Kopiert aus [1]

Im Vispertal (Hohbrunnen und Katzenhaus) ist die Grundwasserspiegeldifferenz am höchsten, was einer Gradient-Steigerung gleichkommt. Diese Beobachtung veranlasste, einen erhöhten Zufluss aus dem hinteren Vispertal als Hauptursache für die aussergewöhnlich hohen GW-Stände im Ortszentrum von Visp (Sommer 2012/2013) zu betrachten.

Die Ergebnisse eigener Berechnungen von GW-Spiegel-Differenzen zu unterschiedlichen Zeitpunkten sind in Abbildung 6 dargestellt.

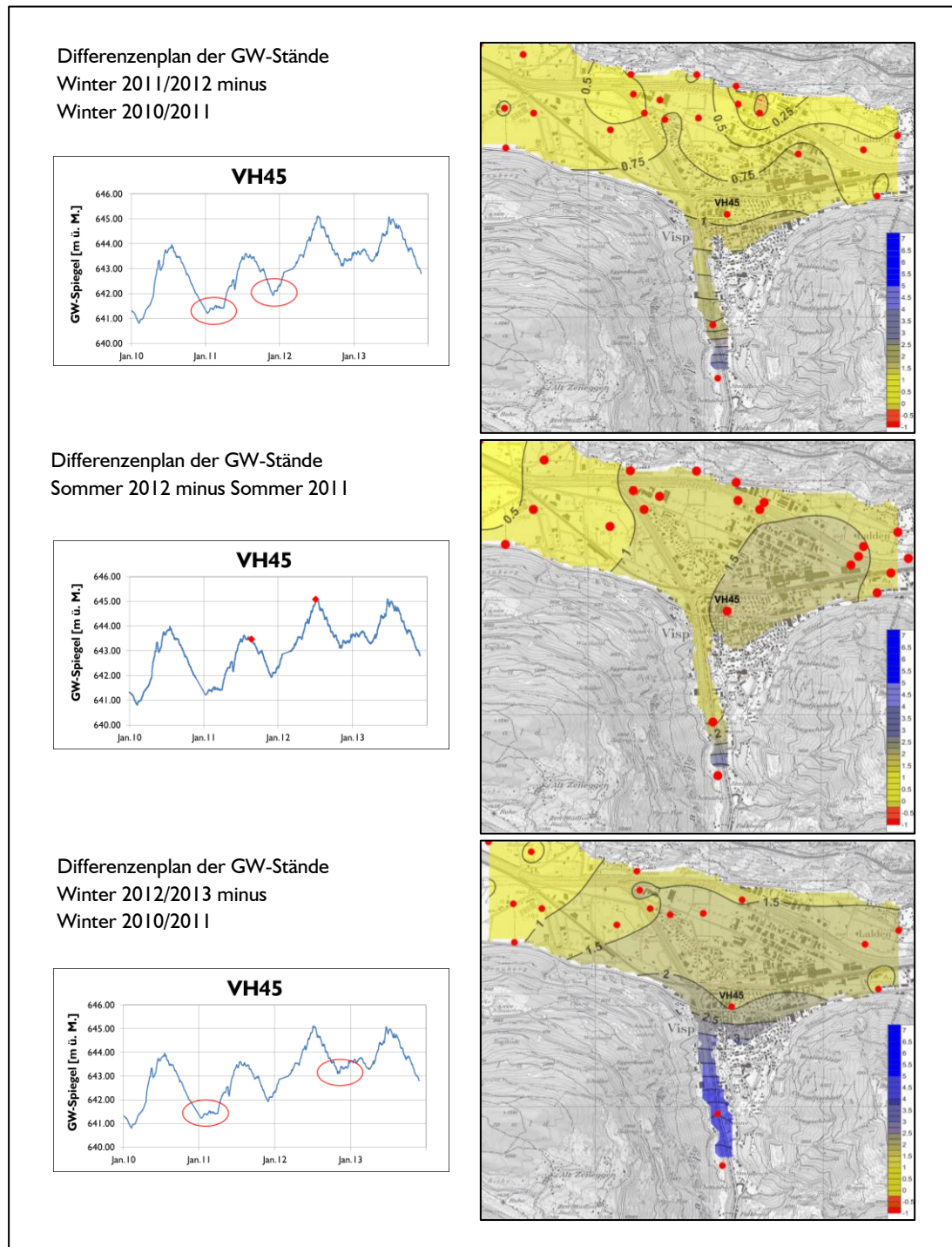


Abbildung 6 Differenzenpläne GW-Spiegel zu unterschiedlichen Zeitpunkten

Aus diesen Differenzenplänen geht als „gemeinsamer Nenner“ der südliche Teil des Vispertals mit auffallend hohen GW-Spiegeldifferenzen hervor.

Die intuitiv auf der Hand liegende Interpretation, dass Veränderungen des Profilzuflusses im Raum Staldbach für diese sich nach Süden vergrössernde Spiegeldifferenzen verantwortlich sind, erweist sich – wie nachfolgende Überlegungen zeigen – als Trugschluss. Vielmehr sind es die besonderen geometrischen Verhältnisse, welche zu diesem Anstieg führen.

Das Grundwasservorkommen Vispertal ist ein sehr schmaler Aquifer mit mittlerer Grundwassermächtigkeit. Demgegenüber stellt das Rhonetal im Raum Visp ein breites Becken mit grosser Mächtigkeit dar. Variationen linearer Zuflüsse erzeugen geometriebedingt (unterschiedliche Reservoir-Volumina) grössere Spiegeldifferenzen im Vispertal. Zu den linearen Zuflüssen gehören Infiltrate von Fliessgewässern und unterirdische Bergwasserzuflüsse. Bei Visp vereinigen sich die beiden Aquifere was eine Glättung der Spiegeldifferenzen zur Folge hat.

Die Ursachenanalyse von 2013 [1] gelangte zum Schluss, dass in den Jahren 2012 und 2013 erhöhte Zuflüsse aus dem hinteren Vispertal der Hauptgrund für die aussergewöhnlichen GW-Anstiege waren. Diese These schien auch dem Projektteam (vgl. Tabelle I) in der Anfangsphase der Mandatsbearbeitung plausibel zu sein, musste aber aufgrund von Simulationsergebnissen⁵ und von vertieften Ganglinienauswertungen letztlich verworfen werden. Jegliche Schwankungen linearer Zuflüsse, wie zum Beispiel unterirdische Bergwasser-Zusickerungen, die sowohl dem Vispertal-Aquifer als auch dem Rhonetal-Aquifer zufließen, führen geometriebedingt automatisch zu einer Differenzenverteilung, wie sie in den vorangehenden Abbildungen dargestellt sind.

⁵ Marginaler Anteil des Profilzuflusses Staldbach an der gesamten Grundwasserbilanz und Ergebnis der Simulation N1 gemäss [8].

5 Die hohen Grundwasserstände von 2012/2013 im lang-jährigen Vergleich

5.1 Resümee

Der Schwerpunkt dieses Kapitels liegt in der Analyse von Ganglinien (Pegelverlauf des Grundwassers und der mit dem Grundwasser in Verbindung stehenden Oberflächengewässer). Die Prozesse, welche zu GW-Anstiegen und -Rückgängen führen, werden zum Teil kurz angeschnitten, sind jedoch im Wesentlichen Bestandteil des Folgekapitels 6.

Das Schwankungsverhalten des Grundwassers im Raum Visp weist einen alpinen Charakter auf. Man spricht von einem glazio-nivalen Regime mit regulären Höchstständen im Juli.

In den Jahren 2012/2013 lagen die GW-Stände im Ortszentrum von Visp durchgehend über den regulären Normwasserständen. Am 7./8. Juli 2012 und am 22./23. Juni 2013 wurden maximale GW-Koten gemessen. Die Differenz zum Normwasserstand betrug gut einen Meter. Zwar handelt es sich um die höchsten Grundwasserstände, die seit Erstellung der Bohrung VH45 (Referenzmessstelle) je gemessen wurden, jedoch lässt die Zeitreihe der Messstelle Im2 im Raum Grosseia Anfang der 1980er Jahre noch höhere Grundwasserstände vermuten.

Kurzzeitige Signale, namentlich Abflussspitzen von Rhone und Vispa, pflanzen sich zwar ins Grundwasser fort, sie trugen aber nur marginal zu den im Ortszentrum beobachteten Höchstständen vom Sommer 2012 und Sommer 2013 bei. Die Ganglinien von Vispa und Rhone weisen unterschiedliche Korrelationen zur Ganglinie des Grundwassers in Visp auf. Ein gewisser Einfluss der Vispa aufs Grundwasser im Ortszentrum ist nachzuweisen; die Rhone weist demgegenüber keinen oder nur einen untergeordneten Einfluss auf. Die zur Diskussion stehenden aussergewöhnlichen Anstiege des Grundwassers können jedenfalls nicht mit den Abflussverhältnissen der Fliessgewässer abschliessend erklärt werden.

Von der Höchststands-Anomalie sind sowohl Messstellen im hinteren Vispental⁶ als auch im Rhonetal⁷ betroffen. Der „Treiber“ der ausserordentlichen Anstiege muss somit einen überregionalen Charakter aufweisen, wie beispielsweise höhere Zuflüsse aus dem umgebenden, stark heterogenen Karst- und Kluft-Grundwasserleiter. Erhöhte Ausgangswasserspiegel in den Wintermonaten können nicht als schlüssige Erklärung der Höchststands-Anomalien herangezogen werden.

5.2 Langjähriger Jahresgang des Grundwassers im Raum Visp

Verfolgt man den Verlauf von Grundwasserständen über mehrere Jahre, ist ein wiederkehrendes Muster zu beobachten. Dieses langjährige, mittlere Schwankungsverhalten des Grundwassers wird als Grundwasserregime bezeichnet. In der Regel operiert man mit

⁶ PW Katzenhaus und PW Hohbrunnen

⁷ VE10 und VD10

langjährigen Monatsmitteln (für Detailbetrachtungen sind auch Berechnungen mit den langjährigen Tagesmittelwerten möglich).

Die Grundwassermessstellen im Raum Visp weisen alle ein glazio-nivales Schwankungsverhalten auf (in der Hydrologie auch alpines Regime genannt), d.h. die regulären Höchststände treten im Monat Juli auf. Damit deckt sich der langjährige Jahresgang mit demjenigen der Rhone und der Vispa, welche im Raum Visp ebenfalls ein glazio-nivales Regime aufweisen.

Aus diesem Schwankungsmuster geht hervor, dass der Einfluss der direkten Grundwasserneubildung (vertikal versickernde Niederschläge in der Talebene) gering sein muss. Diese Zusickerungen würden einen regulären Höchststand in den Monaten Februar bis April erzeugen, d.h. in der Jahreszeit mit geringer Evaporation und geringem Pflanzenwachstum (vgl. [20]).

5.3 Die Sommermaxima 2012/2013 im Ortszentrum von Visp im Vergleich zur Norm

Als Norm bezeichnen wir den oben beschriebenen langjährigen Jahresgang. Um die Abweichungen des Grundwasserpegels zur Norm bzw. Periodizitäten erkennen zu können, werden die Daten geeignet graphisch dargestellt. Dabei sind die folgenden beiden Ganglinien in derselben Grafik abgebildet:

- Tatsächliche Monatsmittelwerte (Effektiver Jahresgang)
- Langjährige Mittel der Monatsmittelwerte (Mittlerer Jahresgang)

Durch unterschiedliche Färbung der Flächen über bzw. unterhalb des mittleren Jahresganges bis zur Linie des effektiven Jahresganges wird veranschaulicht, ob es sich um über- oder unterdurchschnittliche Messwerte handelt (überdurchschnittlich = Grundwasserüberschuss; unterdurchschnittlich = Grundwasserdefizit).

Abbildung 7 und Abbildung 8 visualisieren die Abweichung der Messwerte zur Norm. Der Höchststand vom 7./8. Juli 2012 lag 1.10 m, der Höchststand vom 22./23. Juni 2013 1.20 m über dem Normwert für die entsprechenden Tage.

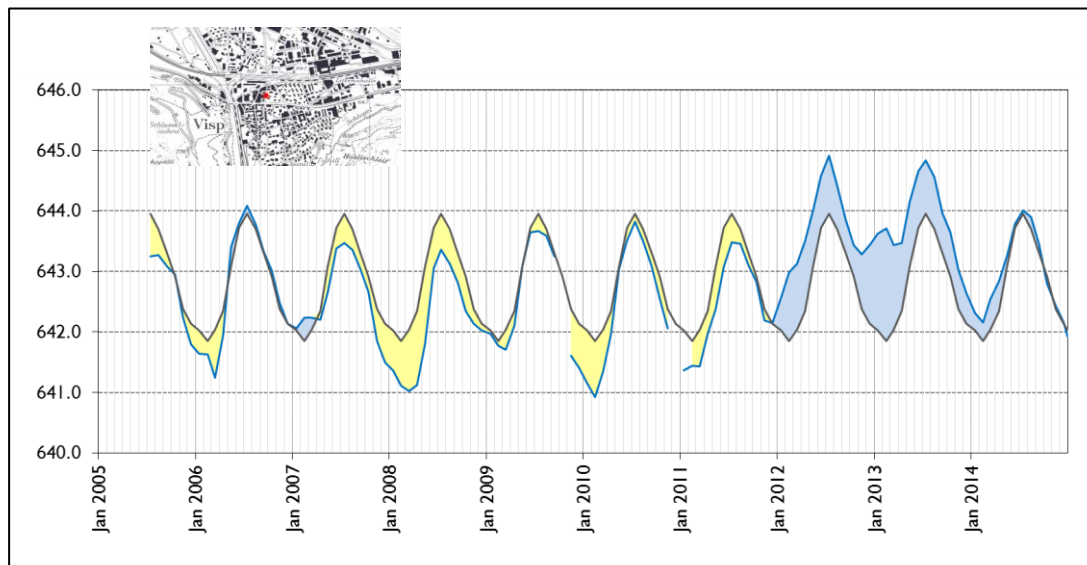


Abbildung 7 Langjährige Periodizität der GW-Messstelle VH45

Erläuterungen:

Datenbasis: Monatsmittel

Berücksichtigte Zeitspanne: Seit dem Zeitpunkt des Loggereinbaus

Schwarze Linie: Langjähriger Jahresgang 2005 – 2014

Blaue Linie: Effektiver Jahresgang

Gelbe Fläche: Grundwasserdefizit

Blaue Fläche: Grundwasserüberschuss

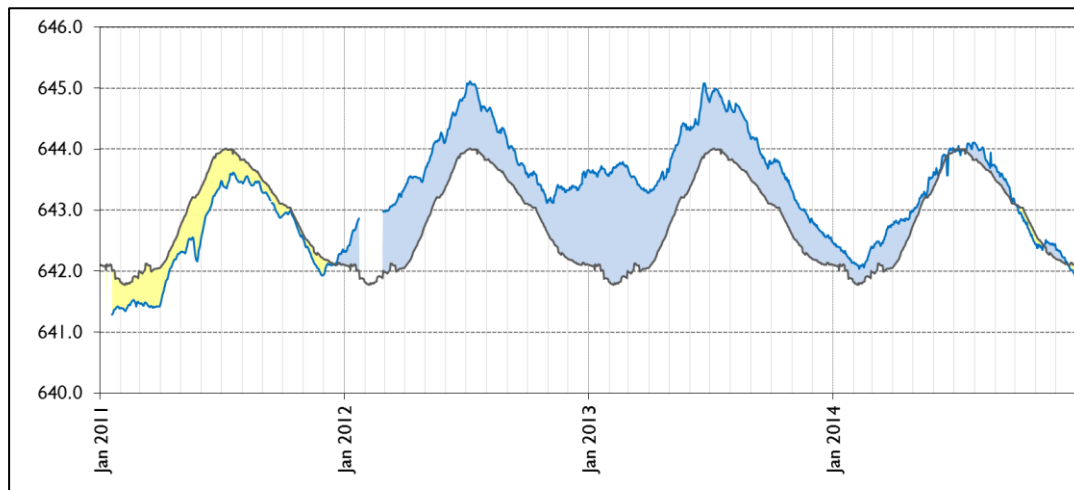


Abbildung 8 Detaildarstellung der Jahre 2011-2014 für VH45

Erläuterungen:

Datenbasis: Tagesmittel

5.4 Grundwasserstände im Vergleich zu den Pegelständen von Rhone und Vispa

5.4.1 Hochwasserereignisse

Hochwasserereignisse wie die Überschwemmungen in den Jahren 1993 und 2000 widerspiegeln sich in den Ganglinien flussnaher GW-Messstellen als kurzzeitig auftretende Peaks. In den zur Diskussion stehenden Jahren 2012/2013 fanden keine solchen Ereignisse statt.

5.4.2 Kurzzeitige Abflussspitzen von Vispa und Rhone

Niederschlagsbedingte Peaks der Abflüsse bzw. Wasserstände von Vispa und Rhone erstrecken sich in der Regel über 2 bis 4 Tage. Sie pflanzen sich ins Grundwasser fort und bewirken – mit einer zeitlichen Verzögerung – auch beim umliegenden Grundwasser kurzzeitige Signale im Zentimeter- bis Dezimeterbereich (vgl. Abbildung 9).

Der bei der GW-Messstelle VH45 gemessene Höchststand vom 7./8. Juli 2012 war unmittelbar nach einer Abflussspitze von Vispa und Rhone zu beobachten. Im darauffolgenden Jahr erreichte das Grundwasser seinen Höchststand am 22./23. Juni. Auch damals zeigten Vispa und vor allem die Rhone einen kurzzeitigen Pegelanstieg. Die späteren Abflussereignisse vom 29.07.2013 und 08.08.2013 liessen dagegen die Grundwasserstände nicht auf Maximalhöhen ansteigen (Abbildung 10).

Oben genannte Beobachtungen lassen folgende Schlüsse zu: Obwohl sich kurzzeitige Abflussspitzen ins Grundwasser fortpflanzen, geben sie keine Erklärung für die über längere Zeit anhaltenden, starken Anstiege des Grundwasserspiegels in den Sommermonaten 2012 und 2013. Solche kurzzeitigen Peaks lassen sich mit der Spitze des Eisbergs vergleichen; sie verursachten lediglich die „letzten“ 10 bis 15 cm der zur Diskussion stehenden Grundwasserhöchststände.

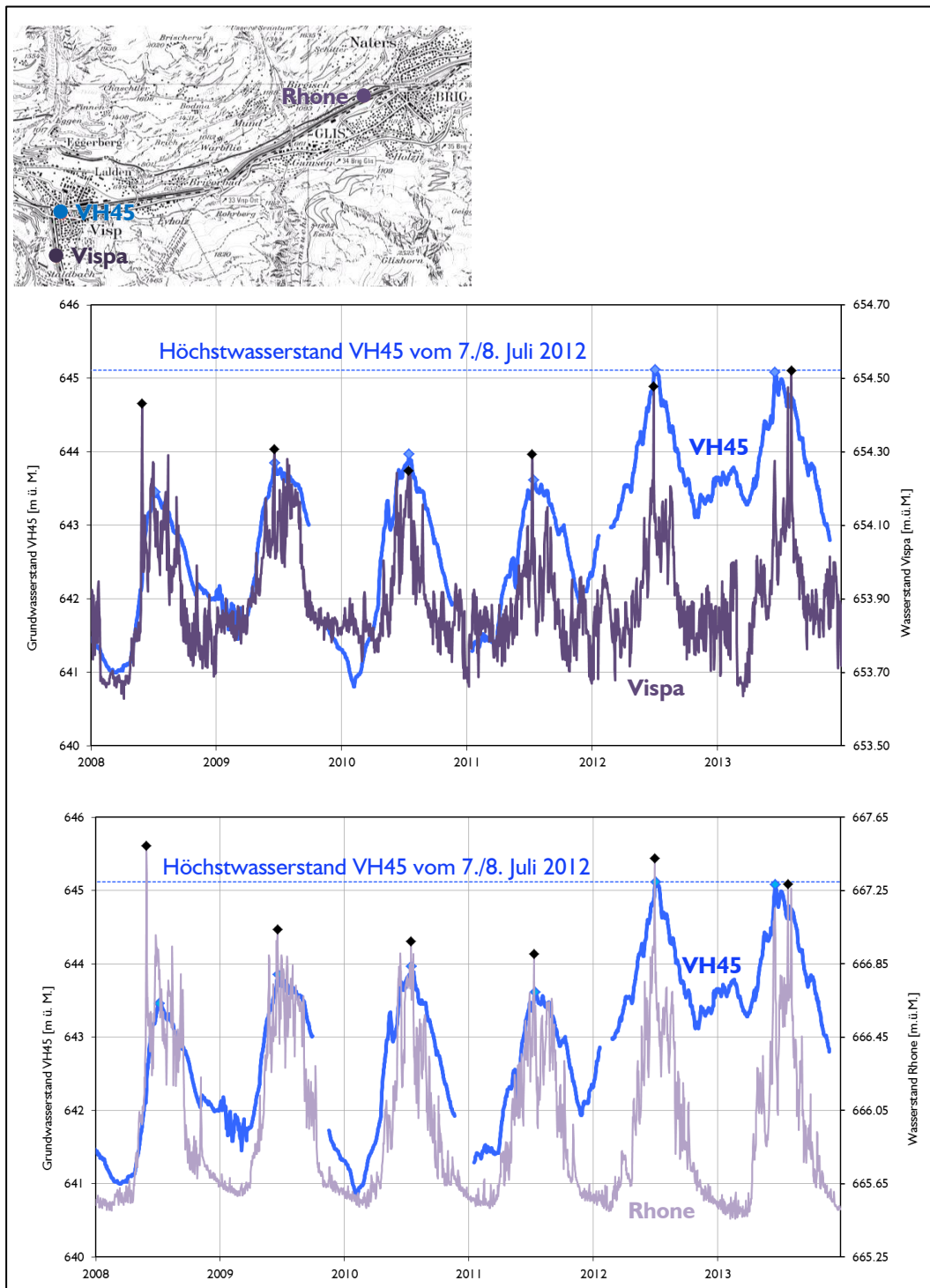


Abbildung 9 Wasserpegel Vispa und Rhone im Vergleich zur Grundwasserganglinie von VH45

Erläuterungen:

Die Jahresmaxima sind für jede Ganglinie hervorgehoben (Raute-Symbol)

Die Höchststände bei VH45 folgen oft auf eine Abflussspitze in den Fließgewässern (mit ca. 1 Tag zeitlicher Verzögerung). Ein Höchststand im Fließgewässer erzeugt aber nicht zwingend einen Maximalstand im Grundwasser (siehe 2008 und 2013).

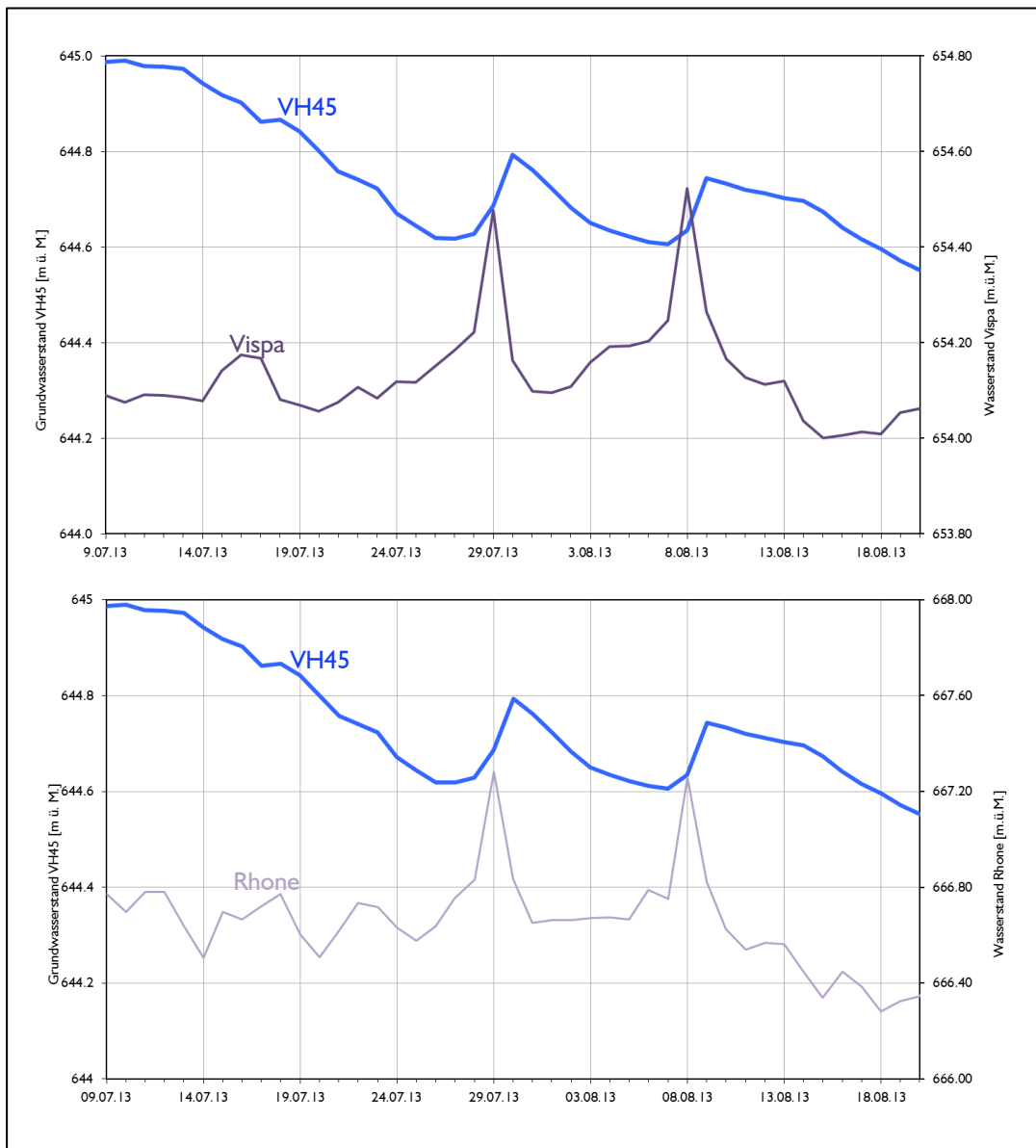


Abbildung 10 Reaktion des Grundwassers auf die Spitzenabflüsse 2013 (Tagesmittelwerte)

5.4.3 Genereller Einfluss Rhone und Vispa aufs Schwankungsverhalten von VH45

In Kapitel 5.4.2 wurde die Signal-Fortpflanzung kurzfristiger Abflussspitzen ins Grundwasser diskutiert. Deren Einfluss scheint relativ moderat zu sein.

Der vorliegende Abschnitt behandelt die generelle Parallelität der Ganglinien von VH45 (Referenzmessstelle im Ortszentrum), Vispa und Rhone. Es ist denkbar, dass der Jahresgang des Grundwassers in Visp mit demjenigen von Rhone und/oder Vispa übereinstimmt. Träfe dies zu, könnte das jährlich wiederkehrende „Basissignal“ von VH45 von der Wasserführung der Fließgewässer diktiert sein.

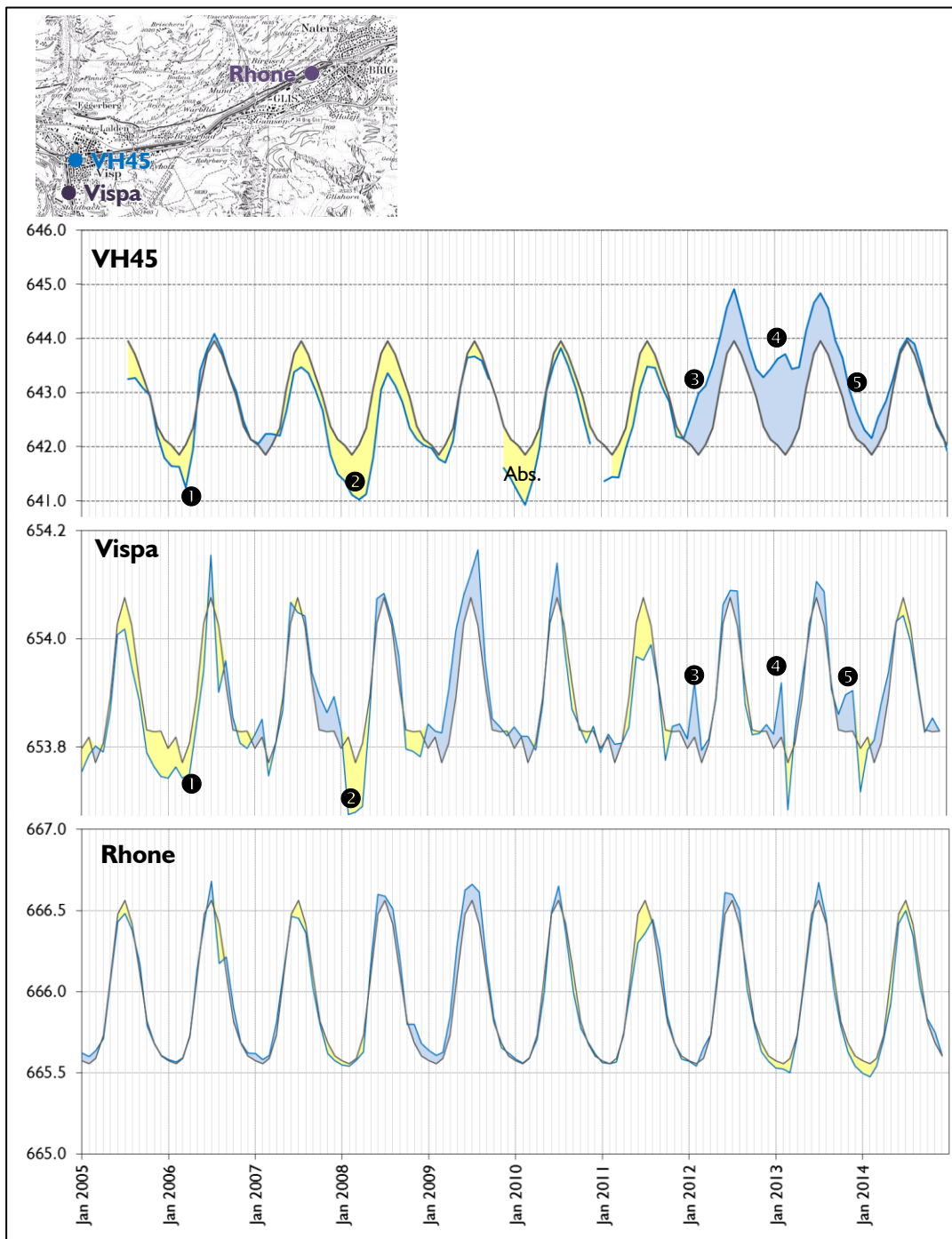


Abbildung 11 Ganglinien VH45, Vispa und Rhone im Überblick

Erläuterung:

Datenbasis: Monatsmittel

Schwarze Linie: Langjähriger Jahresgang 2005 – 2014

Blaue Linie: Effektiver Jahresgang

Abs.: Einfluss GW-Absenkung „Schwarzer Graben“

❶ bis ❺: Über mindestens einen Monat anhaltende Abweichungen zur Norm, die sowohl bei der Vispa als auch – mit zeitlicher Verzögerung und Glättung – bei der Grundwassermessstelle VH45 erkennbar sind.

Wie die nachfolgenden Detailauswertungen veranschaulichen, liegt keine eins-zu-eins-Überstimmung des Pegelverhaltens vor. Eine „gewisse“ Parallelität kann zwischen Vispa und VH45 ausgemacht werden, aber nicht zwischen Rhone und VH45 (vgl. Abbildung 11). Entsprechende statistische Auswertungen können deshalb auf die Beziehung zwischen Grundwasser (VH45) und Vispa fokussiert werden. Sie sind in Kapitel 6.7 im Detail erläutert. Bei diesen Auswertungen zeigt sich, dass die beste Korrelation mit einem gleitenden Mittel der Vispa-Pegelstände über die 20 vorangehenden Tage erzielt wird. Das Bestimmtheitsmass beläuft sich auf $R^2 = 0.46$. Die genannte Mittelwertbildung ermöglicht die statistische Erfassung von Glättungs- und Verschleppungsphänomenen. Abbildung 12 visualisiert dieses Konzept. Mit zunehmender Distanz zum Fließgewässer erhöht sich die Spannweite für die Mittelwertbildung.

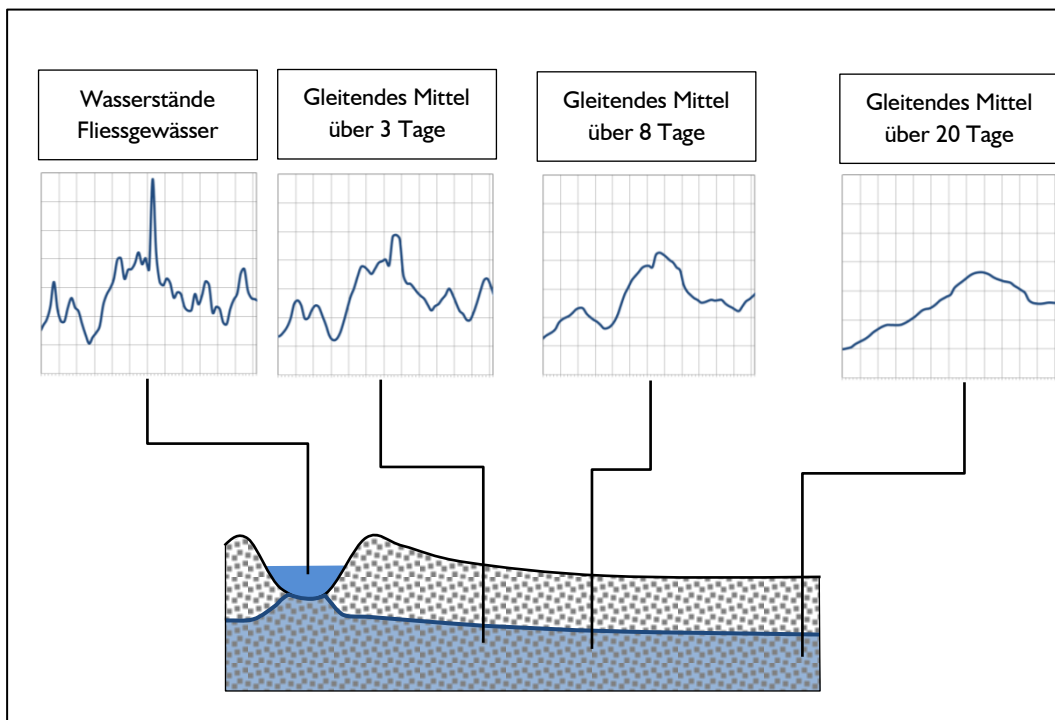


Abbildung 12 Visualisierung des Konzepts „Glättung von Ganglinien mittels gleitender Mittel“

Erläuterungen:

Die Ganglinie links repräsentiert den Verlauf des Fließgewässerpegels. Um diese mit Grundwasserdaten korrelieren zu können, müssen die Fließgewässerdaten mittels gleitender Mittel geglättet werden. Mit zunehmendem Abstand zum Fließgewässer erhöht sich das Zeitfenster der zu berücksichtigenden, vorangehenden Datenpunkte. Die drei dargestellten Ganglinien „Gleitendes Mittel“ entsprechen somit nicht den Grundwasserganglinien, sondern stellen die Referenzganglinien für Korrelationsberechnungen mit den eigentlichen Grundwasserdaten dar.

Eine abschliessende Beurteilung des Einflusses der beiden Oberflächengewässer auf das Grundwasser im Raum Visp ist allein aufgrund dieser Datengrundlage nicht möglich. Im Prinzip sind zwei Abhängigkeiten denkbar:

- 1) Der Einfluss der Vispa auf das Grundwassergeschehen in Visp ist grösser als derjenige der Rhone.
- 2) Speisungsvorgänge, welche das Abflussverhalten der Vispa speziell prägen (und sich bei der Rhone kaum manifestieren), diktieren auch das Schwankungsverhalten des Grundwassers im Raum Visp. Parallelitäten zwischen den Ganglinien Vispa und VH45 könnten sich als „Scheinkorrelationen“ erweisen.

5.5 Meteorologische Anomalie Anfang der 1980er Jahre

Der vorliegende Abschnitt geht der Frage nach, ob die Höchstwasserstände in den Sommermonaten 2012/2013 „einmalig“ waren, oder ob in der Vergangenheit auch schon höhere Grundwasserstände vorkamen.

Für die Messstelle VH45 im Ortszentrum von Visp liegen Einzelmesswerte seit 1989, kontinuierliche Messungen (Loggerdaten) seit 2005 vor. Die Messstelle im Raum Visp mit der längsten Zeitreihe ist die Messstelle Im2. Diese befindet sich im Gebiet Grosseia in unmittelbarer Nähe zur Rhone. Ihr Datensatz reicht bis ins Jahr 1977 zurück. Die Messstelle deckt somit den für die hydrogeologischen Verhältnisse der Schweiz interessanten Zeitraum Anfang der 1980er Jahre ab. Am Übergang von den 1970er zu den 1980er Jahren zeichnete sich eine auffallende Änderung im Niederschlagsregime ab: Es lag eine Serie mit überdurchschnittlich hohen Winterniederschlägen vor. Diese Anomalie war im Mittelland, entlang des Alpennordhangs, in Nordbünden sowie im Wallis zu beobachten [21].

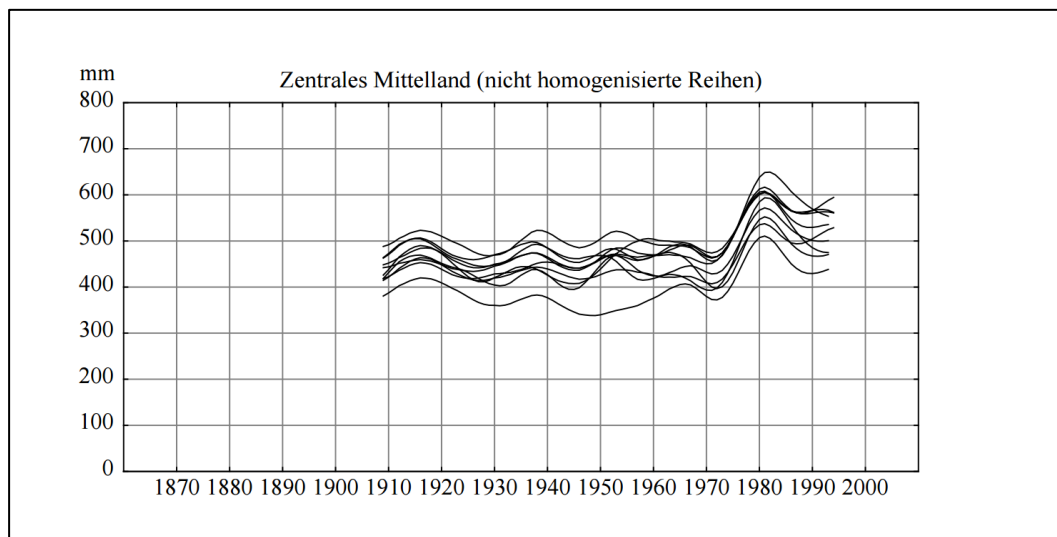


Abbildung 13 Langjährige Entwicklung der Winterniederschläge

Erläuterung:

Quelle: Kopiert aus [21]

Mittel über 20 Jahre an ausgewählten Stationen des zentralen Mittellands

Die aufeinander folgenden Jahre mit erhöhten Winterniederschlägen ergaben in höheren Lagen über der Norm liegende Schneehöhen.

Höhere Winterniederschläge bzw. Schmelzwasserzuflüsse in den darauf folgenden Sommermonaten führten praktisch schweizweit zu deutlich höheren Grundwasserständen [22]. Diese Anomalie zeichnet sich auch in der Ganglinie von Im2 ab. Trotz einiger Datenlücken veranschaulicht Abbildung 14, dass Anfang der 1980er Jahre höhere Grundwasserstände zu verzeichnen waren als in den Jahren 2012/2013.

Vorbehältlich der Übertragbarkeit des Schwankungsverhaltens von Im2 aufs Ortszentrum von Visp waren in Visp Anfang der 1980er Jahre mit grosser Wahrscheinlichkeit noch höhere Grundwasserstände zu verzeichnen als in den Jahren 2012/2013.

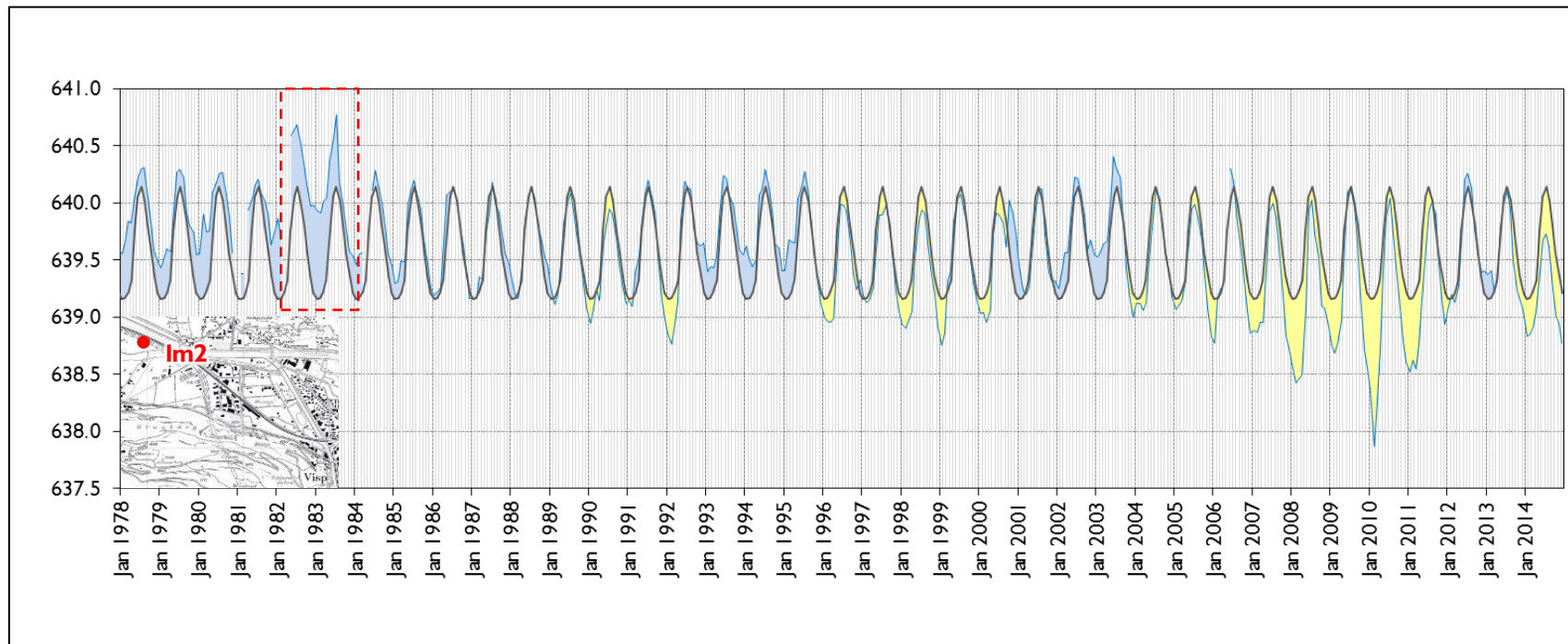


Abbildung 14 Langjährige Periodizität der GW-Messstelle Im2: Visualisierung der Winterniederschlagsanomalie Anfang der 1980 Jahre

5.6 Abrupter Anstieg der GW-Stände beim Jahreswechsel 2011/2012

Wie aus den vorangehenden Auswertungen hervorgeht, zeichnete sich beim Jahreswechsel 2011/2012 (während GW-Tiefstand) ein abrupter Anstieg der GW-Stände im Ortszentrum von Visp ab. Interessanterweise findet sich dasselbe Muster bei Messstellen im Vispertal und im Rhonetal bei Lalden (Abbildung 15). Diese Beobachtung ist im Hinblick auf die Interpretation der aussergewöhnlichen Höchststände in den Sommermonaten 2012/2013 von zentraler Bedeutung:

- Wären die Gründe der aussergewöhnlichen Grundwasseranstiege alleine im hinteren Vispertal zu lokalisieren, würden die Ganglinien der Messstellen VE10 und VD10 in den beiden zur Diskussion stehenden Jahre 2012 und 2013 ein „normales“ Schwanungsverhalten aufweisen.
- Dito gilt fürs Rhonetal: Ein ausschliesslich in diesem Teilgebiet sich abspielender Prozess, der ab dem Jahreswechsel 2011/2012 zu einem abrupten Anstieg der GW-Stände in den Messstellen VE10 und VD10 geführt hätte, wäre bei den Messstellen PW Katzenhaus und PW Hohbrunnen wirkungslos geblieben.

Der Prozess, welcher zum aussergewöhnlichen Anstieg führte, muss somit **überregionalen Charakter** haben. Im Fokus stehen die unterirdischen Zuflüsse aus dem umgebenden Festgestein (wird in Kapitel 6.5 beschrieben).

Ferner zeigt Abbildung 15, dass im Sommer 2013 bei den Messstellen PW Katzenhaus, PW Hohbrunnen, VE10 und VD10 die Pegelstände noch höher lagen als im Sommer 2012 (vgl. auch [1]). Demgegenüber verharrte der Sommerpeak 2013 bei VH45 auf demselben Niveau wie 2012. Diese „bremsende“ Wirkung wird dem Förderregime der Lonza zugeschrieben. Die kontrollierte Erhöhung der Fördermenge wurde als Notmassnahme zwischen der Gemeinde Visp und der Lonza im Jahre 2013 vereinbart. Erläuterungen dazu finden sich in Kapitel 6.4.

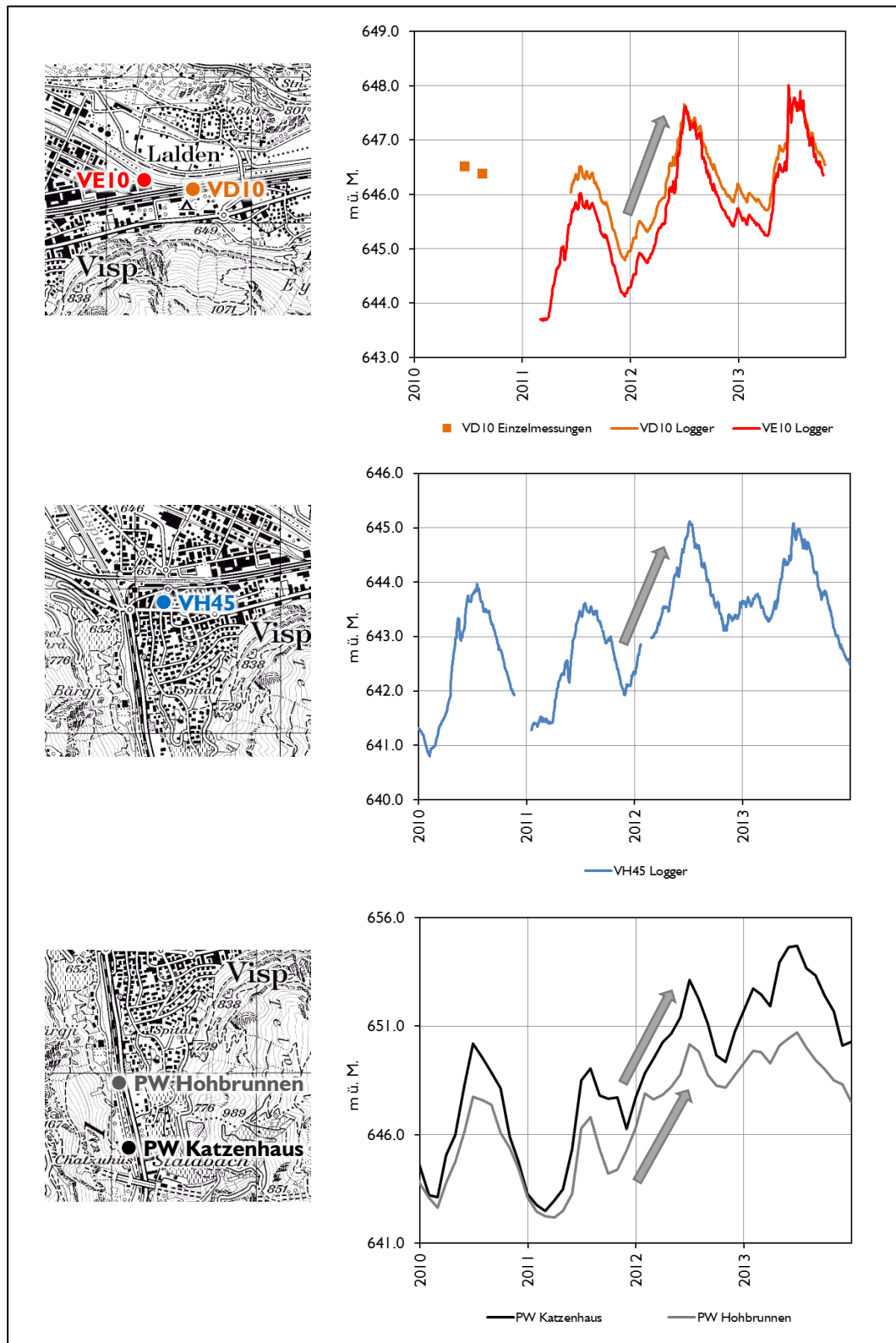


Abbildung 15 Visualisierung abrupten Anstieg der GW-Stände ab Ende 2011

5.7 Winter-Grundwasserstände im Ortszentrum von Visp

In den Diskussionen um den allfälligen „Treiber“ des GW-Anstiegs ab dem Jahreswechsel 2011/2012 wurde u.a. postuliert, dass die Winterwasserstände ungewöhnlich hoch waren und sich die Höchstwasserstände vom Sommer 2012 als Folge einer entsprechend hohen „Ausgangskote“ erklären lassen. Wie aus Abbildung 16 hervorgeht, herrschten in den Jahren 1994-1995 und 2001-2003 deutlich höhere Winterwasserstände als beim Jahreswechsel 2011/2012 vor. Trotzdem waren damals die nachfolgenden Sommerhochwasserstände nicht auf Spitzenwerte angestiegen.

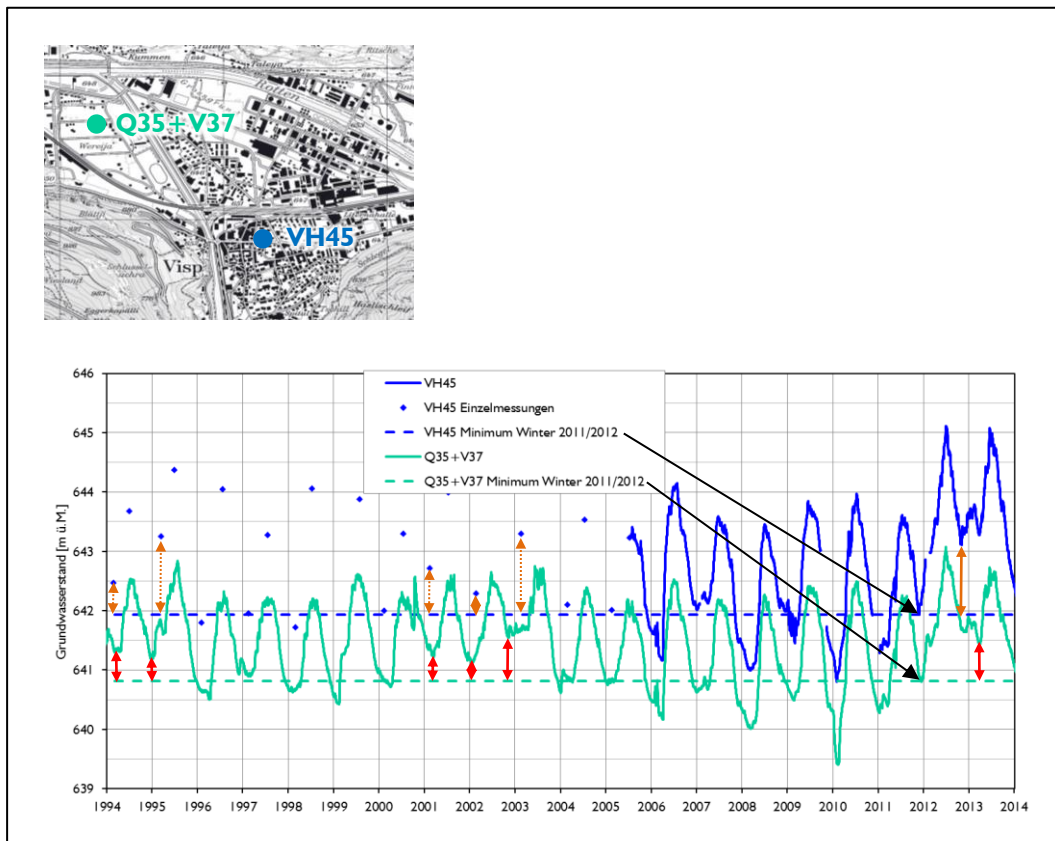


Abbildung 16 Grundwasserstände Winter 2011/2012 im langjährigen Vergleich

Erläuterungen:

Q35 seit 2003 durch V37 ersetzt (Messstelle praktisch am gleichen Standort)

Winterperioden, bei denen die GW-Stände

↑ bei VH45 deutlich über dem Winterwasserstand 2011/2012 lagen (Loggerdaten)

↑ bei VH45 vermutlich über dem Winterwasserstand 2011/2012 lagen (nur Einzelmessungen vorhanden)

↑ bei Q35 deutlich über dem Winterwasserstand 2011/2012 lagen (Loggerdaten)

Die Frage „wie lange dauert die Vorlaufzeit, bei der das Schwankungsverhalten des Grundwassers einen signifikanten Einfluss auf den jährlichen Sommerhochwasserstand hat?“ wurde in [5] detailliert behandelt. Demzufolge weist das Grundwasser in Visp ein „Gedächtnis“ von 30 bis 50 Tage auf. Das „Gedächtnis“ zeigt, wie lange die Wirkung eines zeitlich limitierten Signals im Grundwasser anhält. Ein hoher Winterwasserstand lässt somit nicht auf einen hohen Wasserstand im darauffolgenden Sommer schliessen.

Diese Aussage darf aber nicht zu falschen Schlussfolgerungen führen. In den Winterhalbjahren 2011/2012 und 2012/2013 waren hohe Niederschlagsmengen zu verzeichnen. Im höher gelegenen Einzugsgebiet fielen diese als Schnee. Erst durch die Schneeschmelze kommt es zur massgebenden Signalübertragung auf die Grundwasserstände (Details siehe Kapitel 6.5). Der eigentliche „Winterpeak“ erklärt sich durch Prozesse in der Talebene: In tieferen Lagen versickerten die Winterniederschläge via den ungesättigten Bereich direkt in den Aquifer. Dieser Speisungsvorgang wird als „direkte Grundwasserneubildung“ bezeichnet (vgl. Kapitel 4.5). Mit dem numerischen Grundwassermodell wurde die Sensitivität dieses Prozesses auf den Ganglinienverlauf bei der Referenzmessstelle VH45 geprüft [11]. Abbildung 17 zeigt das Ergebnis der Modellsimulation. Die vorangehend gemachte Aussage wird dadurch bestätigt: Der simulierte um rund einen Meter tiefer liegende Wasserstand beim Jahreswechsel 2011/2012 hat keine Auswirkung auf den Wasserstand im darauffolgenden Sommer.

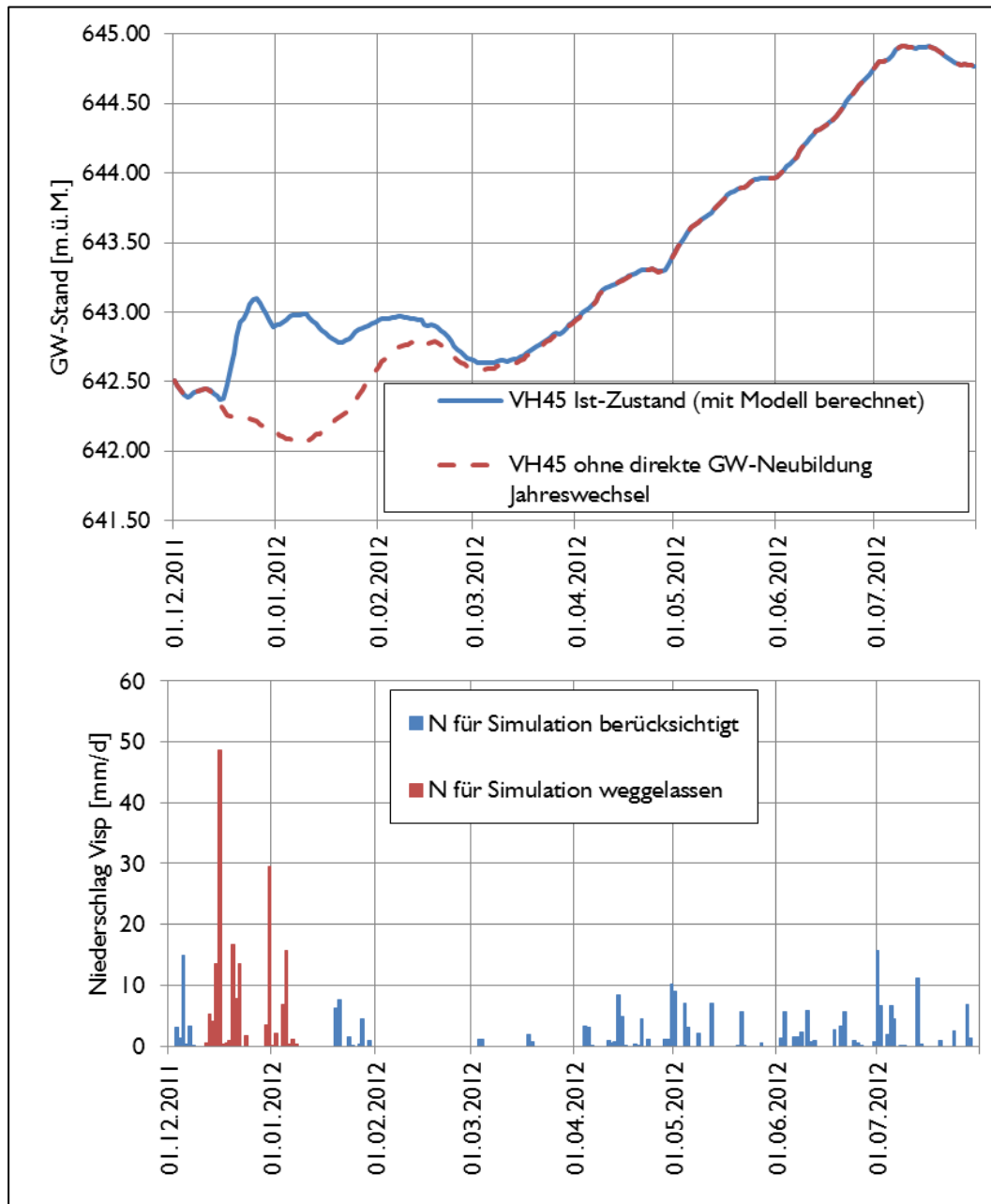


Abbildung 17 Modellsimulation unter Auslassung der direkten GW-Neubildung beim Jahreswechsel 2011/2012

Erläuterung:

Die blaue Linie zeigt den modellierten Verlauf der Ganglinie von VH45 (Ortszentrum Visp) im Ist-Zustand. Die direkte Grundwasserneubildung ist – auch für den Zeitraum Mitte Dezember 2011 bis Mitte Januar 2012 – mitberücksichtigt. Zur Simulation der roten, gestrichelten Linie wurden die Niederschläge im entsprechenden Zeitraum weggelassen (d.h. auf null gesetzt). Ab Mitte März liegen beide Kurven wieder deckungsgleich übereinander.

6 Ursachen der sehr starken Grundwasser-Anstiege in den Jahren 2012/2013

6.1 Resümee

Hydrogeologische Prozesse stellen Verkettungen von Ursachen-Wirkungs-Zusammenhängen dar. Jede Ursache ist ihrerseits Wirkung einer oder mehrerer vorgelagerten Ursachen.

Die Quantifizierung der massgebenden Speisungsvorgänge, welche in den Jahren 2012/2013 generell höhere Grundwasserstände und insbesondere in den entsprechenden Sommermonaten Maximalstände in Visp hervorriefen, ist nur approximativ möglich. Kapitel 5.6 zeigte auf, dass regionale und nicht lokale Phänomene für diese ausserordentlichen GW-Anstiege verantwortlich sein müssen.

Das Auftreten besonderer meteorologischer Gegebenheiten im höher gelegenen Einzugsgebiet ergibt die plausibelste Erklärung der zur Diskussion stehenden „GW-Anomalie“. Es sind jedoch nicht einzelne Niederschlagsereignisse, welche zu GW-Anstiegen in der Talebene führen, denn synchrone Signalübertragungen zwischen Niederschlagsverhalten und Grundwasserschwankungen sind nicht erkennbar. Vielmehr treten Signalverschleppungen auf, welche die Folge von zwei aneinandergekoppelten Speichersystemen sind:

- 1) Schnee und Eis speichern das Meteorwasser; die Versickerung in den Untergrund erfolgt erst beim Schmelzprozess.
- 2) Klüfte und andere wasserwegsame Strukturen im umliegenden Gebirge bilden das zweite Speichersystem. Die Jahresschwankungen des Bergwasserspiegels erzeugen Druckwellen, welche die Dynamik der unterirdischen Felswasserzuflüsse diktieren.

In den Jahren 2012 und 2013 war der gesamte Schmelzwasseranfall grösser als in anderen Jahren. Auch lag vermutlich eine ungünstige zeitliche Verteilung dieses Schmelzwaseranfalls vor. Das Grundwasser im Raum Visp wurde somit durch übermässig viel unterirdisch zufließendes Felsgrundwasser gespeist.

Das meteorologische Geschehen im höher gelegenen Einzugsgebiet beeinflusst auch die Wasserführung von Rhone und Vispa. Beide Fliessgewässer wiesen 2012 und 2013 mehrheitlich über der Norm liegende Pegelstände auf. Deren direkter Einfluss auf die ungewöhnlichen GW-Anstiege im Ortzentrum von Visp ist jedoch von geringerer Bedeutung.

Das natürliche Schwankungsverhalten des Grundwassers wird durch das Förderregime der Fassungen Lonza beeinflusst. Fallen die Förderraten eher gering aus, akzentuiert dies den Anstieg des Grundwassers im Raum Visp (was 2012 der Fall war). Umgekehrt verhindern verstärkte Entnahmen (wie im Sommer 2013) einen noch höheren Anstieg der Grundwasserstände.

6.2 Verkettung von Ursachen und Wirkung

Der Titel von Kapitel 6 führt den Begriff „Ursachen“ auf. Integrierte Systeme, zu denen auch Prozesse der Hydrogeologie zählen, zeichnen sich durch eine Verkettung von Ursachen-Wirkungs-Zusammenhängen aus. Jede Ursache ist ihrerseits Wirkung einer oder mehrerer vorgelagerten Ursachen. Abbildung 18 visualisiert, welche „Kettenglieder“ im Rahmen der vorliegenden Studie untersucht worden sind.

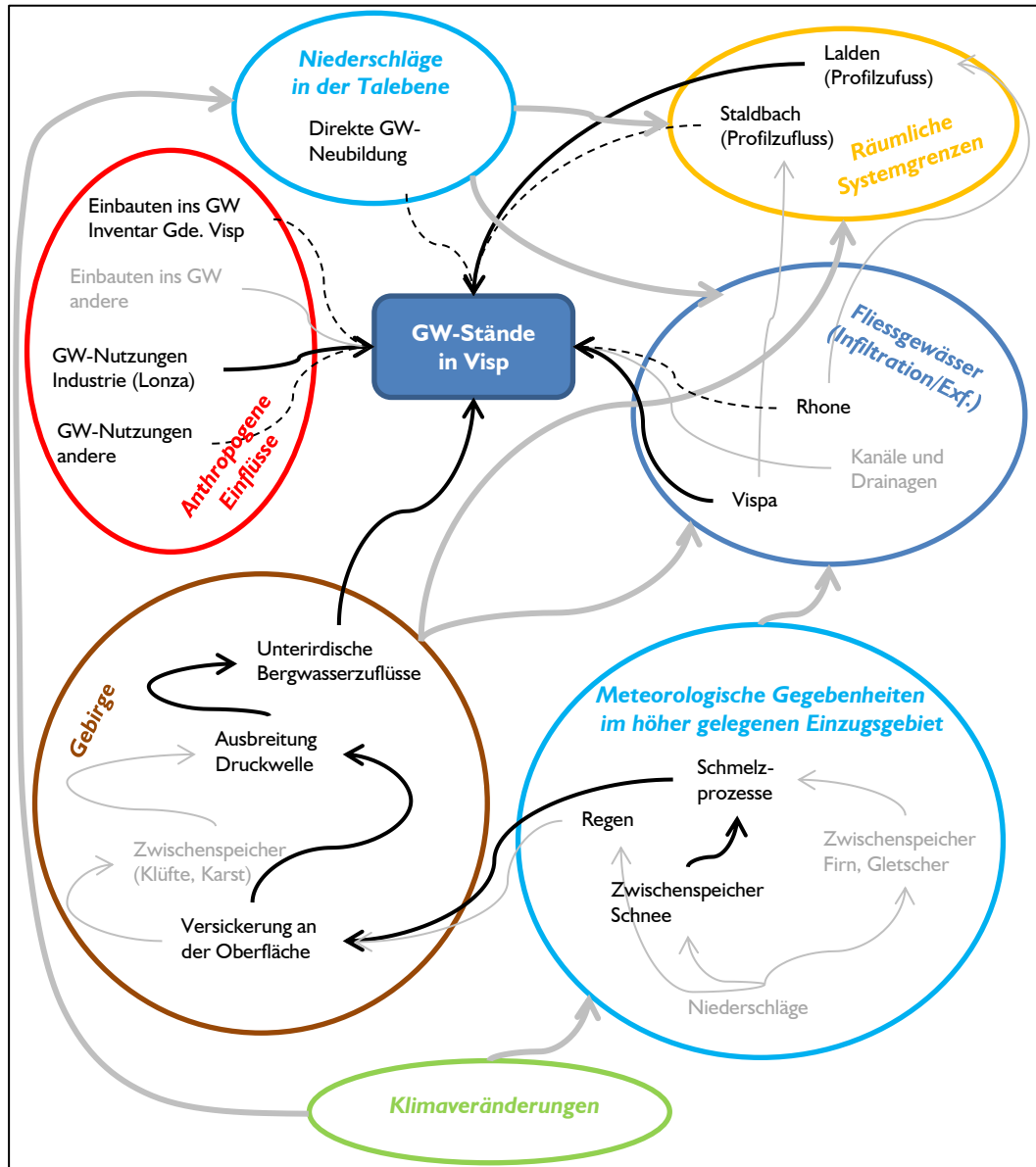


Abbildung 18 Visualisierung von Ursachen-Wirkungs-Zusammenhängen (Auswahl)

Erläuterungen:

- schwarz \longrightarrow untersuchte Systemelemente mit relevantem Systemzusammenhang
- schwarz $-\cdots\rightarrow$ untersuchte Systemelemente, Systemzusammenhang von untergeordneter Relevanz
- grau \longrightarrow nicht untersuchte Systemelemente bzw. Systemzusammenhänge
- grau \longrightarrow nicht untersuchte Zusammenhänge zwischen den Systemgruppen

Kombiniert man die Erkenntnisse aus Kapitel 5.6 mit den Ursachen-Wirkungs-Zusammenhängen gemäss Abbildung 18, ist folgendes festzuhalten:

- Die aussergewöhnlichen Anstiege des Grundwasserspiegels in den Jahren 2012 und 2013 sind im Wesentlichen auf überregionale (und nicht auf lokale) Faktoren zurückzuführen.
- Gesteuert werden diese in erster Linie durch die meteorologischen Gegebenheiten im höher gelegenen Einzugsgebiet. Hierbei handelt es sich um eine positive, bzw. gleichgerichtete Beziehung. Ein höherer Wasseranfall im Einzugsgebiet führt zum Anstieg des Grundwassers im Raum Visp.
- Mittels Ganglinienauswertungen und Modellsimulationen lassen sich die Auswirkungen der Speisungsprozesse aus dem höher gelegenen Einzugsgebiet auf folgende Zwischenglieder der Prozesskette aufteilen: Zuflüsse entlang der Systemgrenze „Profilzufluss Lalden“, Bergwasserzuflüsse aus dem umgebenden Festgestein und Wasserführung von Vispa und Rhone (womit die Infiltration/Exfiltration gesteuert wird). Eine exakte Quantifizierung ist nicht möglich, deshalb werden Bandbreiten angegeben.
- Als lokale Besonderheit ist der Einfluss der Fassungen Lonza zu betrachten. Hierbei handelt es sich um eine negative, bzw. entgegen gerichtete Beziehung: Mit zunehmenden Förderraten gehen die Grundwasserstände zurück bzw. deren natürlicher Anstieg wird künstlich „gebremst“.
- Liegen im Sommer ohnehin schon sehr hohe Grundwasserstände vor, ergeben kurzfristige Ereignisse, bei denen auch die Niederschläge in der Talebene ein Signal im Grundwasser hervorrufen, das „Pünktchen auf dem i“: Die Grundwasserstände im Ortszentrum von Visp stiegen 2012 und 2013 um weitere rund 10 cm an, womit Höchststände erreicht wurden.

Die nachfolgenden Abschnitte zeigen die Relevanz der einzelnen Prozesse auf. Eine besondere Herausforderung im Prozessverständnis stellen hierbei Speichersysteme dar, welche Verzögerungen und Glättungen von Signalübertragungen herbeiführen. Abbildung 19 visualisiert dies am Beispiel der Prozessabfolge Niederschlag – Zwischenspeicherung durch Schnee – Schneeschmelze – Zwischenspeicherung im Gebirge – unterirdische Bergwasserzuflüsse in die Talaquifere.

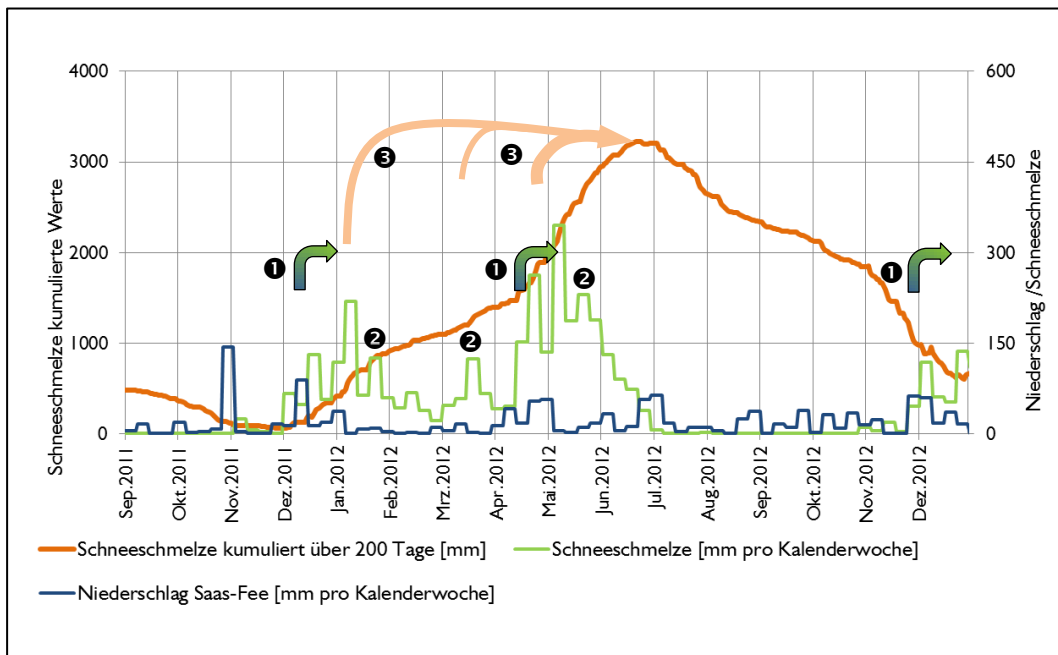


Abbildung 19 Verschiebung und Glättung bei Signalübertragungen

Erläuterungen:

- ❶ Der Schmelzwasseranfall tritt gegenüber dem Niederschlag mit zeitlicher Verzögerung auf. Einzelne Schmelzwasserpeaks (❷) kommen in Zeiten zu liegen, bei denen es in den zwei vorangehenden Wochen kaum Niederschläge gab. Schnee und Eis fungieren als Zwischenspeicher.
- ❸ Das Schwankungsverhalten des Grundwassers korreliert sehr gut mit dem kumulierten Schmelzwasseranfall über 200 bis 240 Tage (vgl. Auswertungen Kapitel 6.5.3). Der gesamte Gebirgskomplex im Einzugsgebiet der Talgrundwasservorkommen bildet den Zwischenspeicher, der diese Glättung und Verschiebung des Signals verursacht.

6.3 Fokussierung aufs Jahr 2012 und modelltechnisches Vorgehen

Die in Kapitel 5.3 dargestellten Ganglinien machen die Analogie der beiden Jahre 2012 und 2013 mit Höchstwasserständen im Sommer deutlich. Bei der Detailanalyse der Ursachenermittlung dieser ausserordentlichen Grundwasseranstiege konzentrieren wird uns – um den Modellier- und Darstellungsaufwand begrenzen zu können – aufs Jahr 2012.

Die Simulationen mit dem kalibrierten Grundwassermodell richten sich auf folgende Fragestellung: Wie wirken sich Schwankungen der einzelnen Zu- und Wegflüsse anteilmässig auf den aussergewöhnlichen GW-Anstieg von 2012 aus? Der Referenzstandort bildet nach wie vor die im Ortszentrum von Visp liegende Messstelle VH45. Wie in Kapitel 5.3 beschrieben, liegt das Maximum vom 7./8. Juli 2012 1.10 m über dem langjährigen Norm-Wasserstand.

Zur Beantwortung dieser Frage wurde im Modell jeweils in Serie ein einzelner Datensatz modifiziert, d.h. die Daten vom Jahr 2012 durch diejenigen vom 2011 ersetzt. Am Beispiel der Vispa-Pegelstände erläutert: Auf welche Kote wäre der Grundwasserstand bei

VH45 im Sommer 2012 angestiegen, wenn der Verlauf der Vispa-Wasserstände denjenigen von 2011 entsprochen hätte?

Die einzelnen Simulationen sind in [8] im Detail beschrieben. Um den Einfluss sehr kurzzeitiger Effekte ausschliessen zu können, wurde als „Stichtag“ nicht der 7./8. Juli sondern der mittlere Grundwasserstand für die Periode vom 2. bis 16. Juli 2012 berücksichtigt.

Im vorliegenden Bericht werden die in [8] dargelegten Simulationsergebnisse nicht eins-zu-eins übernommen. Ergebnisse der statistischen Auswertungen und gewisse im Nachhinein erkannte Schwachpunkte am Modellkonzept berechtigen fallweise zu Korrekturen der Rechenresultate. Solche Modifikationen werden in der Folge dargelegt und begründet.

6.4 Reduzierte Entnahmen bei den Lonza-Fassungen

Obwohl der Einfluss der reduzierten Entnahmen durch die Lonza-Fassungen im „Ranking“ der Ursachen für den ausserordentlichen Grundwasseranstieg erst an dritter Stelle liegt, muss dieser Faktor einleitend diskutiert werden. Anthropogene Einflüsse wie Schwankungen im Förderregime „verfälschen“ die Beziehung zwischen Grundwasserstand und natürlichen Einflussfaktoren. Dies macht sich vor allem bei statistischen Auswertungen bemerkbar (z.B. bei Korrelationsanalysen zwischen Schneeschmelzwasserhöhen und Grundwasserständen).

Die Lonza nutzt das Grundwasser des Rhonetals an vier Standorten (Brunnen „Nord 83“, „Sandmatten Nord“, „Sandmatten Süd“, „Sandmatten B1“). Die kumulierten Förderraten betragen im langjährigen Durchschnitt 12'000 l/min bzw. 200 l/s. Der Mittelwert der Jahre 2011/2012 beläuft sich auf 10'200 l/min bzw. 170 l/s. Gemäss modellierter Grundwasserbilanz machen diese Entnahmen annähernd die Hälfte des gesamten Grundwasserumsatzes im Raum Visp aus (Kapitel 4.5).

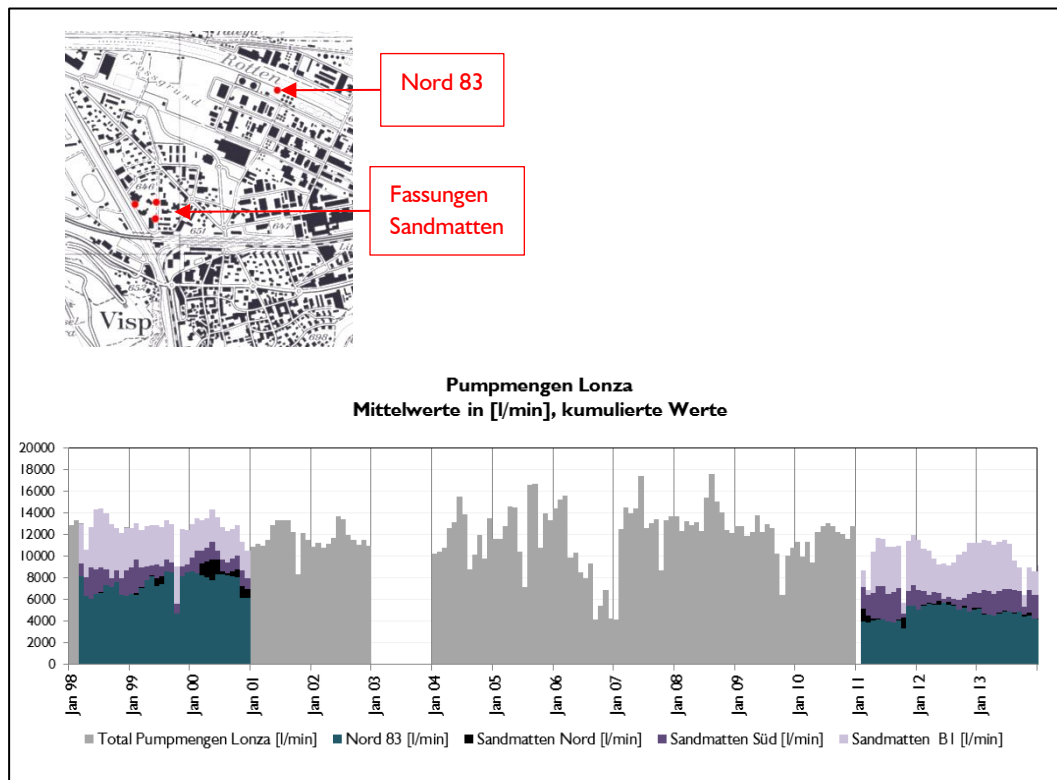


Abbildung 20 Fördermengen Fassungen Lonza, monatliche Durchschnittswerte

Erläuterungen:

Jahre ohne Aufteilung in Einzelbrunnen: Nur Daten der Gesamtfördermengen vorhanden

2003 und Januar 2011: keine Daten der Einzelbrunnen und der Gesamtfördermenge vorhanden (bzw. unvollständig)

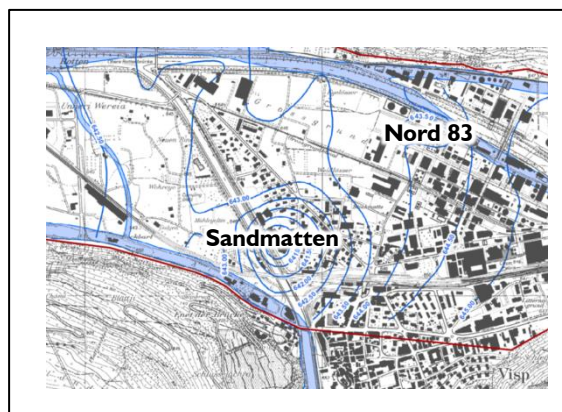


Abbildung 21 Absenkttrichter Fassungen Lonza

Quelle:

CREALP: Carte de la surface piézométrique moyenne, Hautes-Eaux 1995, Carte représentative de l'état de la nappe phréatique en régime estival.

Bereits ein von der CREALP konstruierter Isohypsenplan für die Grundwasserverhältnisse vom Sommer 1995 macht deutlich, dass sich der Absenktichter – insbesondere der Fassungen Sandmatten – bis ins Ortszentrum von Visp erstreckt (Abbildung 21).

Das numerische Modell bestätigt diese Feststellung. Die Grundwasserstände der Messstelle VH45 werden vom Förderregime beeinflusst. Da die Pumpraten nicht konstant sind, ist der Einfluss auf die Grundwasserstände von Visp zeitlichen Variationen unterworfen. Von besonderem Interesse sind die Förderraten in der Zeitperiode mit regulären Anstiegen des Grundwassers, d.h. in den Monaten Mai bis Juli. Je höher die Entnahmen, desto mehr wird der Anstieg „gebremst“. Abbildung 22 setzt die durchschnittlichen Mai-Juli-Pumpraten der Ganglinie von VH45 gegenüber.

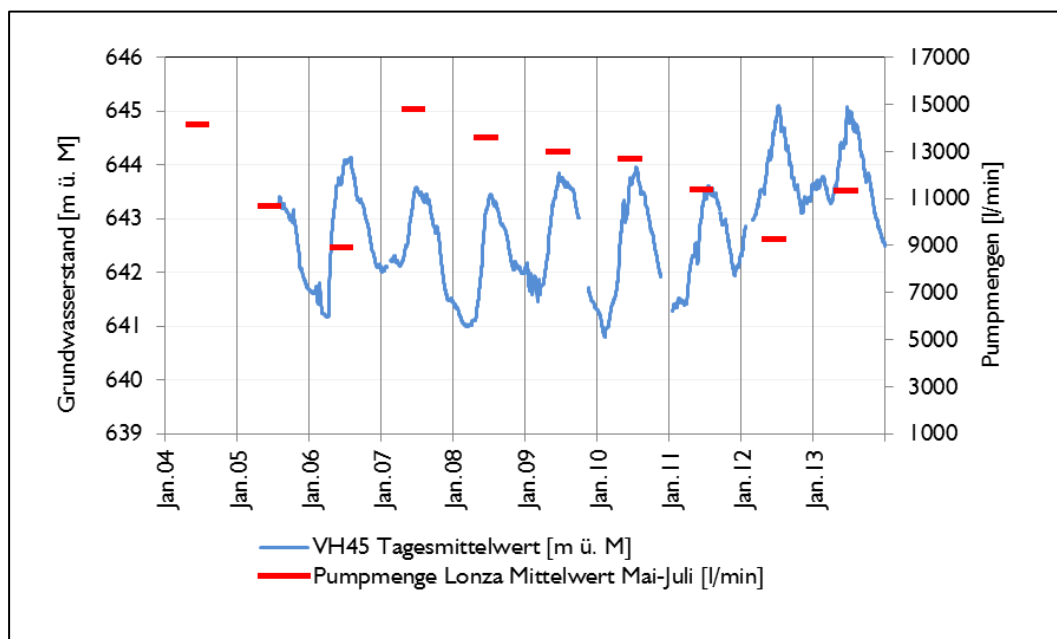


Abbildung 22 Mittl. Fördermengen Monate Mai bis Juli und Ganglinie VH45 im Vergleich

In den Monaten Mai bis Juli 2012 wurde gut 20% Grundwasser weniger gefördert als in den entsprechenden Vorjahresperioden. Dies führte zu einer geringeren Absenkung des Grundwasserspiegels im Raum Visp. Wenn im Jahre 2012 gleich viel Grundwasser gepumpt worden wäre wie im Jahr 2011, hätten die Grundwasserstände im Zentrum von Visp laut Simulationsergebnissen Anfang Juli 2012 rund 30 cm tiefer gelegen. Die geringeren Fördermengen der Lonza stellen einen „anthropogen verursachten“ Grund dar, weshalb im Sommer 2012 die Grundwasserstände im Zentrum von Visp überdurchschnittlich hoch angestiegen sind. Die Entnahmereduktion erklärt 15 – 25% des aussergewöhnlichen GW-Anstiegs von 2012 (Synthese der Modellergebnisse und der gutachterlichen Einschätzung).

Wie in Kapitel 5.6 beschrieben, lagen im Sommer 2013 im hinteren Vispertal und im Zuflussbereich Lalden noch höherer GW-Stände vor, als im Sommer 2012. Demgegenüber verharrten die Wasserstände 2013 in Visp auf dem Vorjahresniveau. Dank verstärkter Nutzung zwischen Mai und Juli 2013, die vorausschauend durch die Gemeinde Visp ver-

anlasst wurde, konnte im Ortszentrum ein noch massiverer GW-Anstieg verhindert werden. Abbildung 23 visualisiert diesen Einflussbereich im räumlichen Kontext.

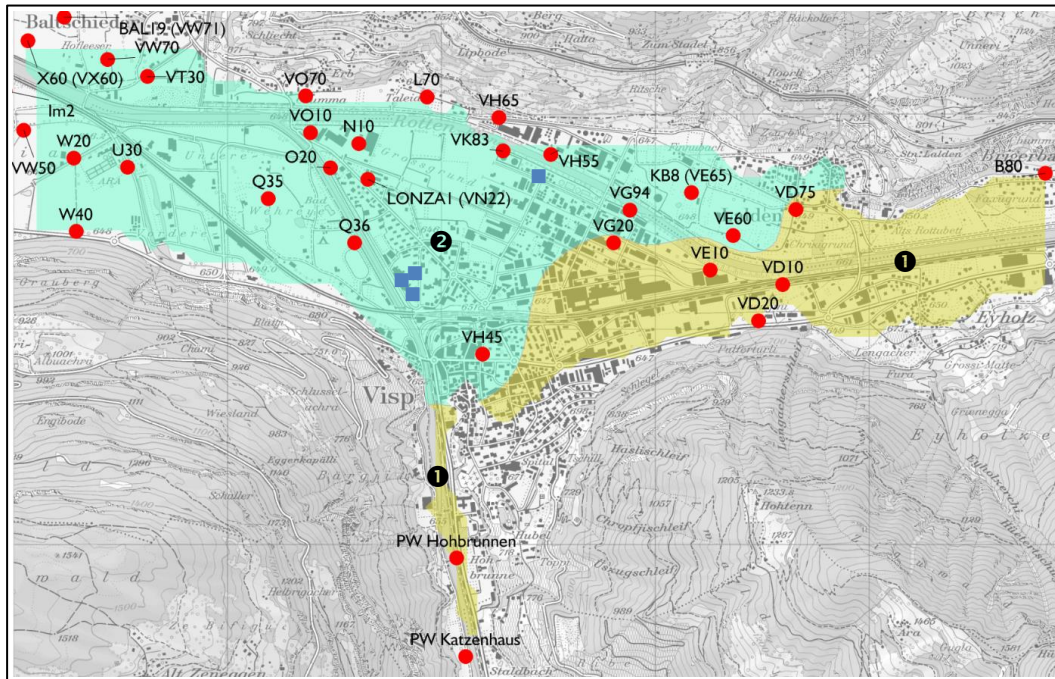


Abbildung 23 Postulierter Einflussbereich der Fassungen Lonza

Erläuterungen:

■ Fassungen Lonza

● GW-Messstellen mit Einzel- oder Loggerdaten im fraglichen Zeitraum Sommer 2012 und Sommer 2013

① Im gelb markierten Bereich lagen die GW-Höchststände 2013 mindestens 10 cm über den Höchstständen von 2012. Wir gehen davon aus, dass hier die verstärkten Förderraten der Lonza-Fassungen vom Sommer 2013 keinen Einfluss aufs Schwanungsverhalten des Grundwassers hatten.

② Im grün markierten Bereich lagen die GW-Höchststände 2013 tiefer als die Höchststände von 2012 (bzw. im Maximum 10 cm darüber). Das erhöhte Förderregime im Sommer 2013 hatte eine „bremsende“ Wirkung zu Folge, d.h. die Grundwasserstände stiegen weniger stark an, als aufgrund der natürlichen Gegebenheiten anzunehmen war.

Das Pumpregime der Lonza „verfälscht“ somit den natürlichen Pegelverlauf des Grundwassers in Visp. Aufgrund der Distanzen und der generellen Strömungsrichtung wirken sich die Entnahmen in den Fassungen Sandmatten stärker aus, als diejenigen beim PW Nord 83. Mit Blick auf die nachfolgenden Kapitel wären detaillierte Angaben zu den Förderraten der einzelnen Brunnen fürs Jahr 2009 sehr dienlich (leider stehen für diesen Zeitabschnitt nur die monatlichen Gesamtsummen zur Verfügung).

2009 gilt als sehr „nasses“ Jahr mit

- über längere Zeit sehr hohen Wasserständen bei Vispa und Rhone (vgl. Kapitel 5.4.3)
- hohen Mengen an Schneeschmelzwasser (vgl. Kapitel 6.5).

Trotzdem stieg das Grundwasser im Zentrum von Visp wie auch in den im Abstrombereich liegenden Messstellen (Q35 und Im2) nicht auf ungewöhnlich hohe Koten an. Ob erhöhte Entnahmen in den Fassungen Sandmatten dafür verantwortlich waren, bleibt ungeklärt. Einen interessanten Hinweis gibt die Ganglinie der Messstelle B80, welche ausserhalb des Einflussbereichs der Lonza-Fassungen liegt. Hier lagen im Jahr 2009 deutlich erhöhte Wasserstände vor.

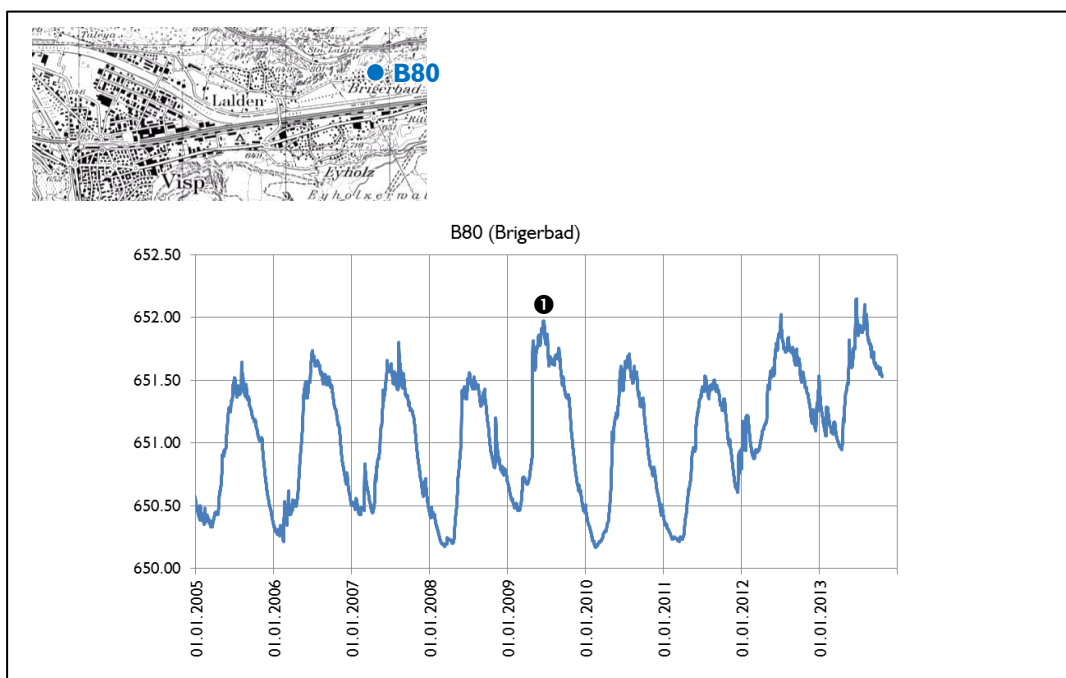


Abbildung 24 Ganglinie einer Messstelle ausserhalb des Einflussbereichs der Lonza-Fassungen

Erläuterung:

❶ Hohe Grundwasserstände im Sommer 2009, die bei den Messstellen im Raum Visp (Einflussbereich Fassungen Lonza) nicht zu beobachten sind.

Im Hinblick auf die künftige Grundwasserbewirtschaftung im Raum Visp ist eine Frage von besonderer Bedeutung: Was würde geschehen, wenn die Fassungen Lonza komplett ausser Betrieb genommen würden? Mit dem Modell wurde diese Situation simuliert. Die Grundwasserstände in Visp (VH45) würden gegenüber dem heutigen, beeinflussten Zustand um 0.6 bis 1.6 m höher liegen [8].

6.5 Unterirdische Zuflüsse aus dem umgebenden Festgestein

6.5.1 Genereller Überblick

Kenntnisse über physikalische und chemische Parameter bei einzelnen Bohrungen zeugen vom Einfluss unterirdischer Zuflüsse aus umgebenden Felsformationen. So wird beispielsweise in [19] auf erhöhte Sulfatgehalte im Grundwasser des hinteren Vispertal verwiesen. Grund dafür dürften Felswasserzuflüsse aus triadischen Gesteinen sein.

Es ist unbestritten, dass Bergwasserzuflüsse einen erheblichen Anteil des gesamten Grundwasserumsatzes ausmachen (gemäss Modellberechnungen 23% aller Zuflüsse). Schwierig ist es, die *Dynamik* dieses Prozesses zu erfassen.

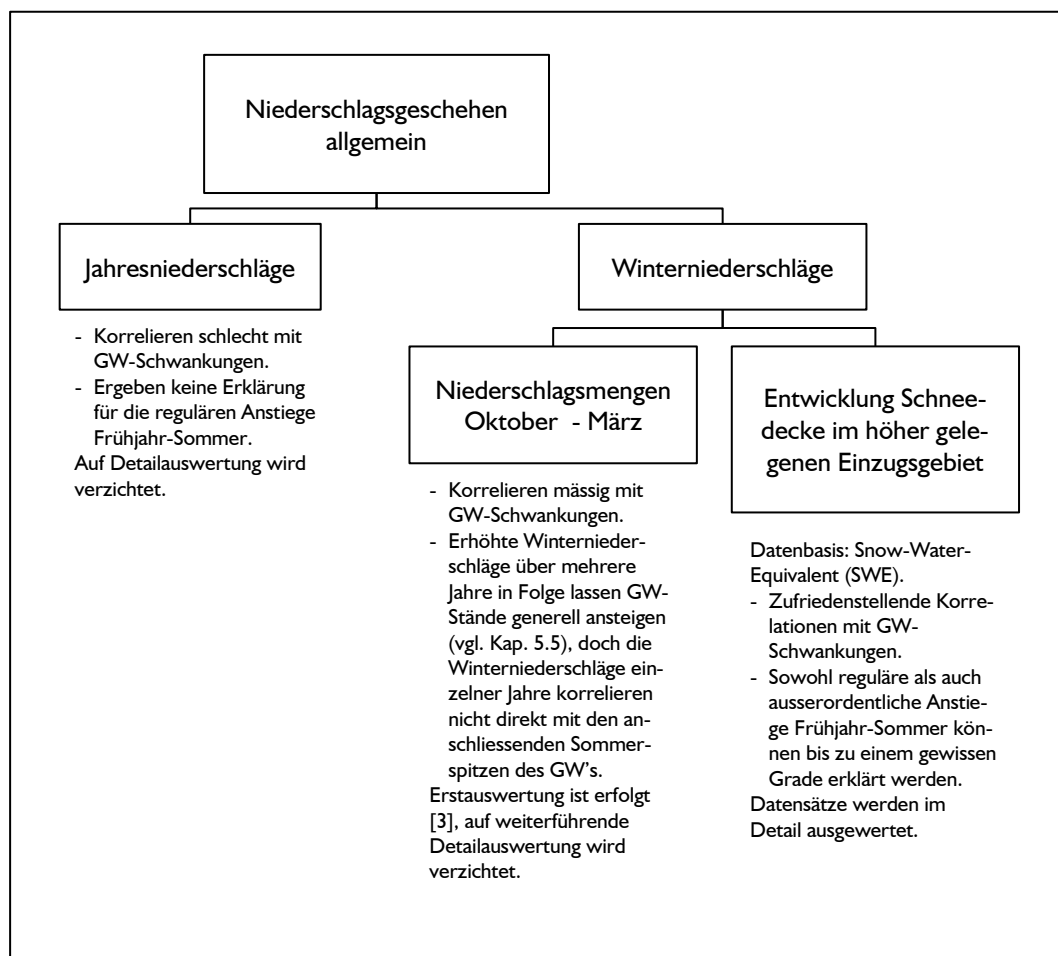


Abbildung 25 Auswertung Niederschlagsdaten im Überblick

Die Schwankungen der Felswasserzuflüsse werden durch Variationen des Bergwasserspiegels im entfernten Einzugsgebiet gesteuert (Ausbreitung von Druckwellen). Zu diesen Variationen tragen direkt auf der Geländeoberfläche infiltrierende Regenfälle bei, sowie versickerndes Schmelzwasser (Schnee, Firne und Gletscher fungieren als Wassers-Zwischenspeicher). Die nachfolgend aufgeführten Datenauswertungen fokussieren sich

auf den Schnee-Schmelzprozess als wichtigstes Steuerungselement von saisonal auftretenden Druckwellen. Diese Druckwellen „stossen“ das die Talsohlen umsäumende Berg-Grundwasser in die Lockergesteins-Aquifere. Die in Form von Regen anfallenden Niederschläge lassen keine schlüssige Wiedergabe der Signalübertragung zu. Abbildung 25 zeigt das Auswertungsprozedere im Überblick.

6.5.2 Reaktion des Grundwassers auf Winterniederschläge

Abbildung 26 vergleicht die Grundwasserstände von VH45 und Q35 mit der Summe der Winterniederschläge⁸. Bei den Diagrammen handelt es sich um einen Mix aus Balken- und Liniengraphiken, weshalb an dieser Stelle einige Erläuterungen im Sinne einer „Lesehilfe“ aufgeführt sind:

- Die stark schwankenden blauen Kurven geben die Tagesmittelwerte der beiden untersuchten Logger VH45 und Q35 wieder.
- Darüber gelegt ist eine gezackte Linie, welche die Jahresmaxima miteinander verbindet. Diese Jahresmaxima sind allerdings nicht mit einer Datumsfunktion eingegeben, sondern jeweils Mitte Jahr dargestellt.
- Als Balken sind die Summen der Winterniederschläge der beiden SMA-Stationen Stalden und Saas angegeben. In der Graphik sind diese Balken zeitverschoben dargestellt. Sie sind auf die Jahresmitte projiziert und zeigen die Winterniederschläge zwischen dem 1. Oktober des Vorjahres und dem 31. März des laufenden Jahres auf.

Die in Abbildung 26 dargestellten Diagramme erlauben folgende Schlüsse:

- 1) Die Entwicklung der Jahre 1993 bis 1995 lassen vermuten, dass eine mehrjährige Serie mit erhöhten Winterniederschlägen zu generell höheren Grundwasserständen führen. Dies analog zu den in Kapitel 5.5 beschriebenen Verhältnissen.
- 2) Einmalige hohe Winterniederschläge wie in den Jahren 2001 und 2009 ergeben keine nennenswerten Maximalwasserstände im darauf folgenden Sommer.
- 3) Die zur Diskussion stehende Grundwasserstands anomalie 2012/2013 lässt sich nicht durch eine aussergewöhnlich hohe Niederschlagssumme im vorausgegangenen Winterhalbjahr erklären.

⁸ Daten SMA im Sinne der „Niederschlags-Wassersäule“, also ohne Differenzierung in Regen und Schnee

Fazit:

Auf eine detaillierte Auswertung der Beziehung zwischen Winterniederschlägen und den darauf folgenden Sommer-Grundwasserständen kann unseres Erachtens verzichtet werden. Durch diesen Datenvergleich lassen sich weder die hohen Grundwasserstände vom Sommer 2012 erklären, noch führen ausserordentlich hohe Winterniederschläge in Einzeljahren zwangsläufig zu erhöhten Grundwasserständen im darauf folgenden Sommer.

Die Speisung des Berggrundwassers, das sich entlang der Talsohlen in die Aquifere des Vispertals und des Rhonetals ergiesst, muss letztlich auf meteorologische Gegebenheiten zurückzuführen sein. Allerdings braucht es eine geeignetere Datenbasis, um diesen Prozess bzw. die Signalübertragung nachvollziehen zu können. Im Folgenden fokussieren wir uns auf den Schnee-Schmelzprozess.

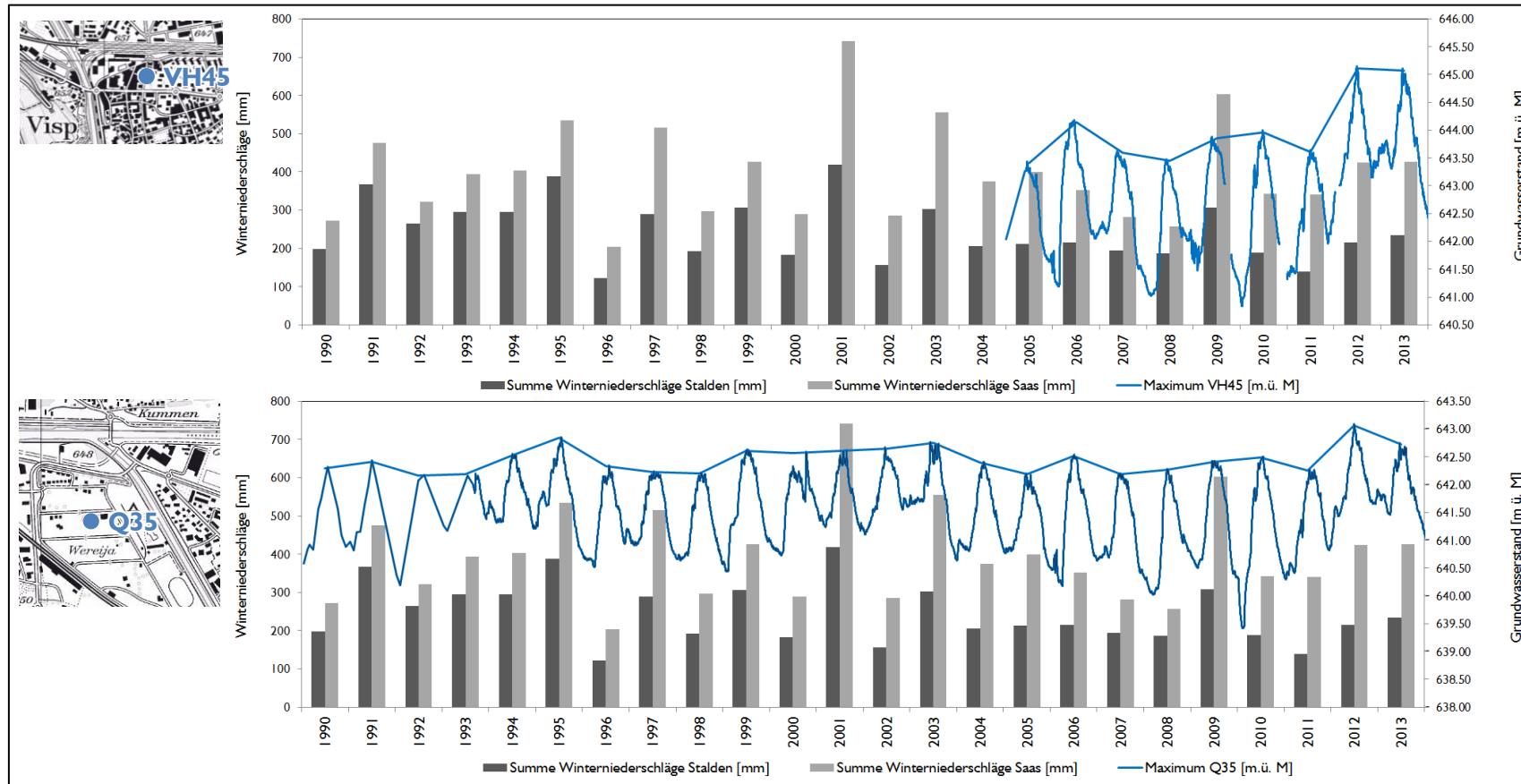


Abbildung 26 Winterniederschläge im Vergleich zu den GW-Schwankungen von VH45 (Ortszentrum) und Q35 (Wereya)

6.5.3 Einfluss der Schneeschmelze auf die Grundwasserschwankungen in Visp

Abbildung 27 visualisiert den Zusammenhang zwischen Berggrundwasser und Schmelzprozessen (Ausbreitung von Druckwellen).

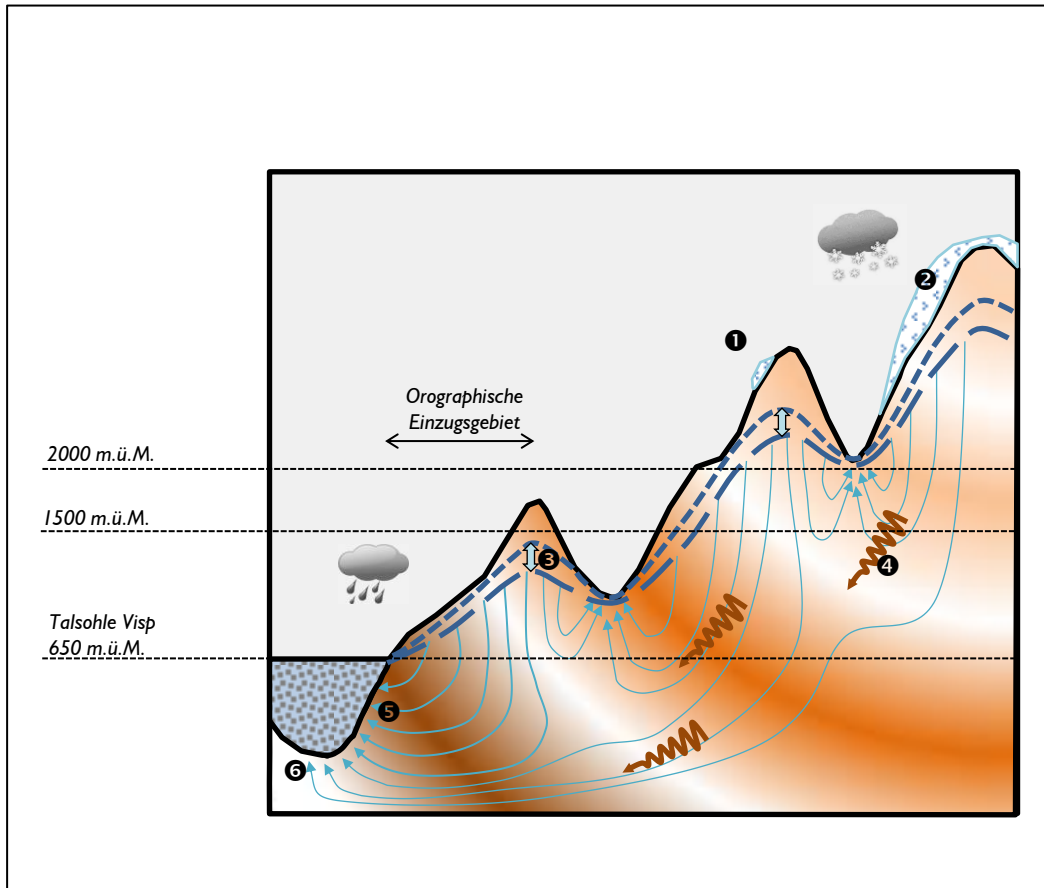


Abbildung 27 Berggrundwasser (hydrogeologisches Modell)

Erläuterungen:

Auf ca. 1500 m ü.M. beträgt der Anteil Schnee am durchschnittlichen Jahresniederschlag rund einen Drittel. Ab 2000 m fällt bereits mindestens die Hälfte des Niederschlags als Schnee [23]. Schnee, Firne (1) und Gletscher (2) fungieren als Zwischenspeicher. Die Neubildung von Gebirgsgrundwasser, das entlang Klüften, Spalten und Schichtgrenzen zirkuliert, ist saisonalen Schwankungen unterworfen, was den Berggrundwasserspiegel variieren lässt (5). Diese Variationen erzeugen Druckwellen, welche sich unabhängig von lokalen Fließpfaden im gesamten Gebirgskomplex ausbreiten. In der Abbildung ist die Ausbreitung von Druckwellen in Brauntönen inkl. Schwingungspfeile (4) dargestellt. Die **Dynamik** dieses Prozesses wird mithilfe des **Schneeschmelzwasseranfalls** charakterisiert. Die den Lockergesteinsgrundwasservorkommen Vispertal und Rhonetals zufließenden Bergwassermengen wurden für die numerische Modellierung wie folgt festgelegt: Die Gesamtmenge an seitlichen, unterirdischen Bergwasserzuflüssen (6) entspricht 40% des langjährigen durchschnittlichen Niederschlags im orographischen Einzugsgebiet. Das durch die Ausbreitung der Druckwellen gesteuerte Schwankungsverhalten wird mit dem Schneeschmelzwasseranfall korreliert (Methode im vorliegenden Unterkapitel beschrieben). Der basale unterirdische Bergwasserzufluss (7) wurde im untersten Modell-Layer mit einem konstanten Betrag von 0.5 mm/Tag als vertikaler Zufluss implementiert.

Die in diesem Abschnitt dargelegten Auswertungen beziehen sich somit auf den Zusammenhang zwischen Grundwasserschwankungen und anfallendem Schnee-Schmelzwasser. Die Daten zum Snow Water Equivalent (SWE)⁹ bilden die Grundlage dafür. Das Schmelzwasser entspricht der negativen Differenz des SWE von einem Tag zum nächsten. Für Korrelationsbetrachtungen zum Grundwasser werden die SWE-Tagesdaten für eine bestimmte „Vorlaufzeit“ kumuliert. Diese Methode erlaubt es, die zeitliche Verzögerung der Signalübertragung zwischen Schmelzwasseranfall und Anstieg des Grundwassers zu berücksichtigen. Es werden zwei Datensätze im Detail dargelegt:

- 1) Die Grundwasserganglinie von VM45 (Ortszentrum von Visp) wird den SWE-Daten von fünf Stationen im Matter- und Saastal gegenübergestellt. Zur Bestimmung des mittleren Tagesschmelzwassers des gesamten Einzugsgebietes wird die Schmelzwasserhöhen der Einzelstationen aufsummiert und durch deren Anzahl ($n=5$) dividiert.
- 2) Die Grundwasserganglinie von B80 (Brigerbad) wird mit den SWE-Daten der Station Mund verglichen. Obwohl die Messstelle B80 ausserhalb des Modellperimeters liegt, ist sie für solche Berechnungen von besonderer Relevanz. Wie in Abbildung 23 dargestellt, dürfte sie ausserhalb des Einflussbereichs der Fassungen Lonza liegen.

Ergebnisse:

Darstellungen: Die graphische Darstellung der Berechnungen geht aus den Abbildungen 28, 29 und 30 hervor.

Vorlaufzeit: Der Kurvenverlauf der Schmelzwasserhöhe_{kum}, welcher am besten mit demjenigen des Grundwasserstandes korreliert, wird durch die Summe über 200 bis 240 vorangehende Tage gebildet.

Bestimmtheitsmass R^2 : Die Korrelationsanalysen ergeben für die Auswertung der Messstelle Brigerbad (B80) ein leicht besseres Bestimmtheitsmass als für die Referenzmessstelle VH45 in Visp ($R^2 = 0.45$ gegenüber 0.43). Dies erstaunt nicht, denn das Grundwasser in Visp wird durch das Pumpregime der Lonza beeinflusst (Kapitel 6.4). Der deutlich von der GW-Ganglinie abweichende Schmelzwasseranfall im Jahr 2009, bewog zu folgender Überlegung: Bei hohen Schmelzwasserraten dürfte der Boden bereits weitgehend gesättigt sein. Zusätzlich anfallendes Schmelzwasser fliesst oberflächlich ab. Für die Wertepaare SWE-Mund und GW Brigerbad (B80) lässt sich das Bestimmtheitsmass auf $R^2 = 0.50$ erhöhen, wenn die SWE-Tageswerte bei 80 mm/Tag gekappt werden (vgl. Abbildung 30).

⁹ Als Snow Water Equivalent (SWE) wird die hydrologische Signifikanz der Schneebedeckung bezeichnet [32]. Anhand der Dichte des Schnees wird berechnet, wieviel Wasser bei einer kompletten Abschmelzung der Schneedecke resultieren würde.

Folgerungen:

Das dynamische Schwankungsverhalten der unterirdischen Felswasserzuflüsse aus dem umliegenden Gebirge scheint wesentlich durch das Schneeschmelzverhalten diktiert zu sein. Mit den bisher durchgeführten statistischen Auswertungen resultiert eine „Vorlaufzeit“ von 200 bis 240 Tagen (kumulierte Werte). Die Schneeschmelze hat während des gesamten Winters einen Einfluss auf den Verlauf des Grundwasserstands. Mit Hilfe der SWE-Daten kann die Grundwasserkurve mit den hier präsentierten Auswertungen bis zu rund 50% interpretiert werden. Die Schmelzwasserhöhe_{kum} gibt somit einen Hinweis, weshalb im 2012 und 2013 hohe GW-Stände vorherrschten. Auch Beobachtungen im Vallon de Réchy für die Periode 2010 – 2014 bestätigen, dass in den Winterhalbjahren 2011/2012 und 2012/2013 überdurchschnittliche Schneeschmelzen zwischen April und Juni zu verstärkter Grundwasserneubildung beitrugen [24].

Die Dynamik von Regenfällen, dem Schmelzen der Schneedecke, dem Schmelzen von Firnen und Gletschern, der Ausbreitung von Druckwellen im Gebirgskomplex und der Speisung der Talgrundwasserleiter durch unterirdische Felswasserzuflüsse ist detailliert zu untersuchen. Bis vor wenigen Jahren fokussierte sich die Forschung ausschliesslich auf den Zusammenhang zwischen Schneeschmelze und Abflussverhalten von Fließgewässern [25]. Ausgereifte Modellansätze, um die SWE-Daten mit dem Schwankungsverhalten des Grundwassers in Verbindung zu bringen, fehlten weitgehend. Erst in jüngster Zeit wurden im Alpenraum Arbeiten in diese Richtung initiiert (z.B. [26], [27]). Sie sind auch Bestandteil einer erweiterten Zusammenarbeit zwischen DUS, CREALP und dem CHYN (Centre d'Hydrogéologie et de Géothermie de l'Université de Neuchâtel).

Die vorliegende Studie versteht sich als ein erstes Herantasten an methodische Ansätze. Eine weitere Ausdehnung und Verfeinerung der Vorgehensweisen hätte den Rahmen des Studienauftrags gesprengt (Gegenstand von Forschungsaufträgen). Hier eine nicht abschliessende Liste möglicher Ansätze:

- Räumliche Einteilung der Gebirgskomplexe in mehrere Teilgebiete;
- Berücksichtigung unterschiedlicher Vulnerabilitäten von geologischen Einheiten;
- saisonale Gewichtung der Schmelzwasserraten (z.B. höhere Gewichtung der SWE-Mengen im Frühsommer als im Winter).
- differenzierte Gewichtung in Funktion der Schmelzwasserhöhe (in Analogie zur dargestellten „Kappung“ bei einem $SWE \geq 80 \text{ mm/Tag}$ für die Station Mund);
- zusätzliche Implementierung von Niederschlägen, die bei höheren Temperaturen direkt als Regen anfallen.

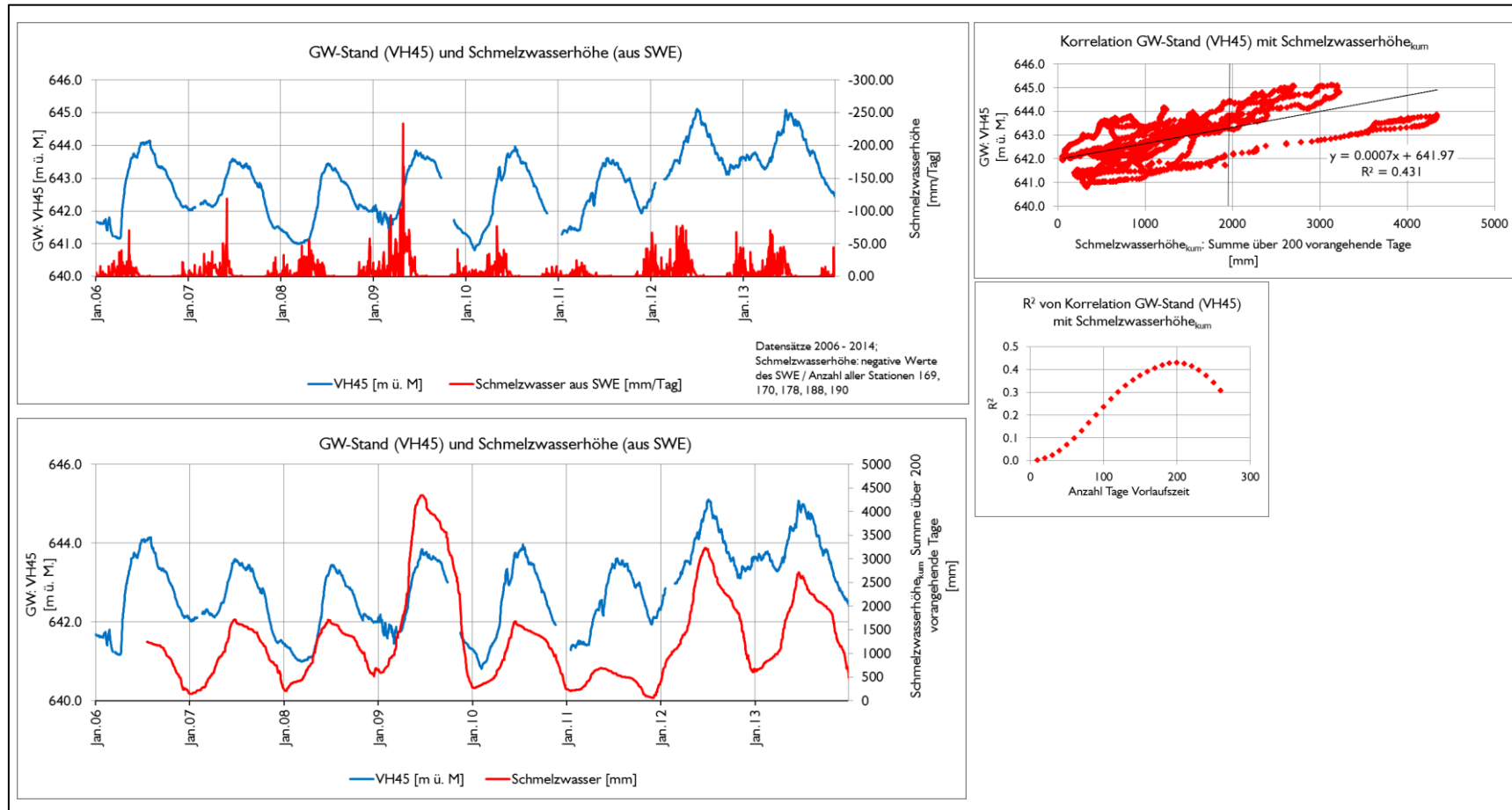


Abbildung 28 Vergleich Schnee-Schmelzwasseranfall mit GW-Ganglinie VH45 (Visp)

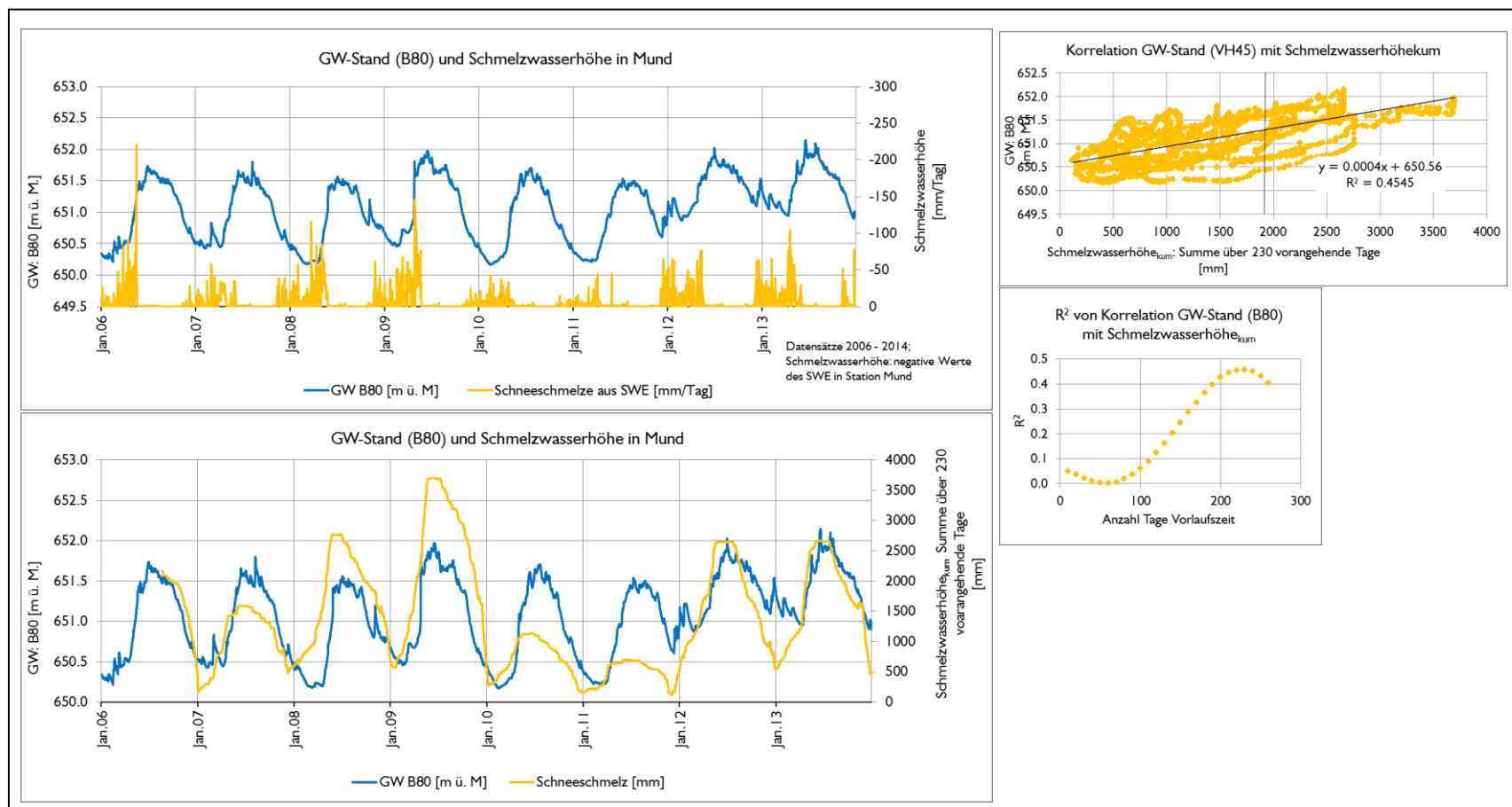


Abbildung 29 Vergleich Schnee-Schmelzwasseranfall mit GW-Ganglinie B80 (Brigerbad)

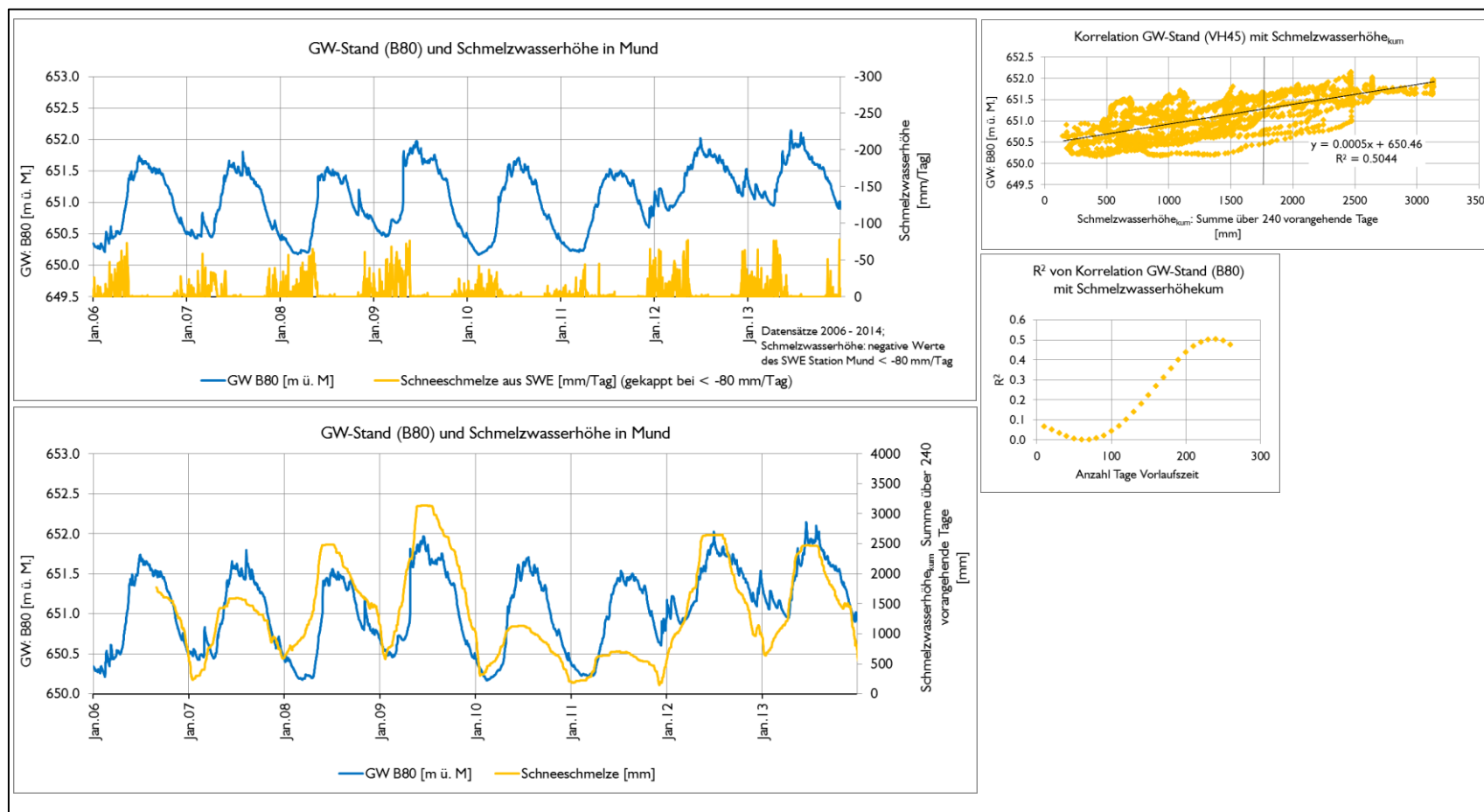


Abbildung 30 Vergleich Schnee-Schmelzwasseranfall mit GW-Ganglinie B80 (Brigerbad), ohne Berücksichtigung von Schmelzwasserraten von > 80 mm/Tag

6.5.4 Anteil der unterirdischen Bergwasserzuflüsse an den aussergewöhnlichen Grundwasseranstiegen von 2012 und 2013

Mit dem Grundwassermodell wurde eine Reduktion der seitlich zuströmenden Felswasserzuflüsse um 25% gegenüber den effektiven Inputdaten simuliert. Der Einfluss auf die GW-Stände im Ortszentrum von Visp sind bei diesem Ansatz relativ gering (7 cm). Nicht variiert wurde jedoch der basale Flächenzufluss im Basis-Layer des 3D-Modells.

Der Bilanzanteil unterirdischer Felswasserzuflüsse am gesamten Grundwasserumsatz (vgl. Abbildung 4), die Ganglinien von Messstellen ohne wesentlichen Einfluss des Pumpregimes der Lonza (vgl. Abbildung 15), sowie die oben dargelegten statistischen Auswertungen machen deutlich, dass der Einfluss des Bergwasseranfalls auf die Grundwasserstände im Ortszentrum von Visp deutlich höher ausfällt. Die Zunahme der Bergwasserzuflüsse erklären unseres Erachtens rund 20 – 30% der Grundwasseranomalie in den Sommermonaten 2012/2013.

6.6 Profilzufluss Lalden

Der Profilzufluss Lalden stellt die oberstromige Systemgrenze im Rhonetal dar. Im Grundwassermodell wird diese Grenze als Festpotenzialrand mit zeitlich variierenden GW-Koten definiert. Da die entsprechenden Messstellen im Frühjahr/Sommer 2012 und 2013 ebenfalls starke Anstiege aufwiesen, erhöht sich dementsprechend der berechnete Profilzufluss. Dessen Einfluss auf den ausserordentlichen Anstieg im Ortszentrum von Visp wird auf 25 – 35% geschätzt.

Die Gründe für den Anstieg beim Profilzufluss Lalden dürften in erster Linie bei erhöhten Bergwasser-Zusickerungen im östlich gelegenen Einzugsgebiet zu finden sein. Diese sind wiederum mit der Menge an Schneeschmelzwasser erklärbar. Weitere mögliche Einflüsse gehen aus Abbildung 18 hervor.

6.7 Erhöhte Abflüsse von Vispa und Rhone

In den zur Diskussion stehenden Jahren 2012 und 2013 wiesen Vispa und Rhone mehrheitlich Pegelstände über der Norm auf (vgl. Abbildung 11). In früheren Jahren war diese Abweichung aber deutlich ausgeprägter.

Laut Modellsimulationen ist der Einfluss der Rhone auf das Grundwassergeschehen in Visp stärker als derjenige der Vispa [8]. Ganglinienanalysen und statistische Auswertungen zeigen aber das Gegenteil. Im vorliegenden Bericht wird die Auffassung vertreten, dass der Einfluss der Vispa eindeutig über demjenigen der Rhone ist (vgl. Kapitel 5.4.3).

Die Schwankungen des Vispa-Pegels pflanzen sich – bezogen auf den gesamten Datensatz – mit einer zeitlichen Verzögerung und entsprechender Glättung ins Grundwasser fort. Die beste Übereinstimmung ergibt sich mit einer Vorlaufzeit (kumulierte Werte) von 20 Tagen. Das Bestimmtheitsmass R^2 beläuft sich im Vergleich zur geglätteten Vispa-Ganglinie und der Ganglinie von VH45 (Grundwasser Zentrum von Visp) auf 0.46. Entsprechende Darstellungen finden sich in Abbildung 31.

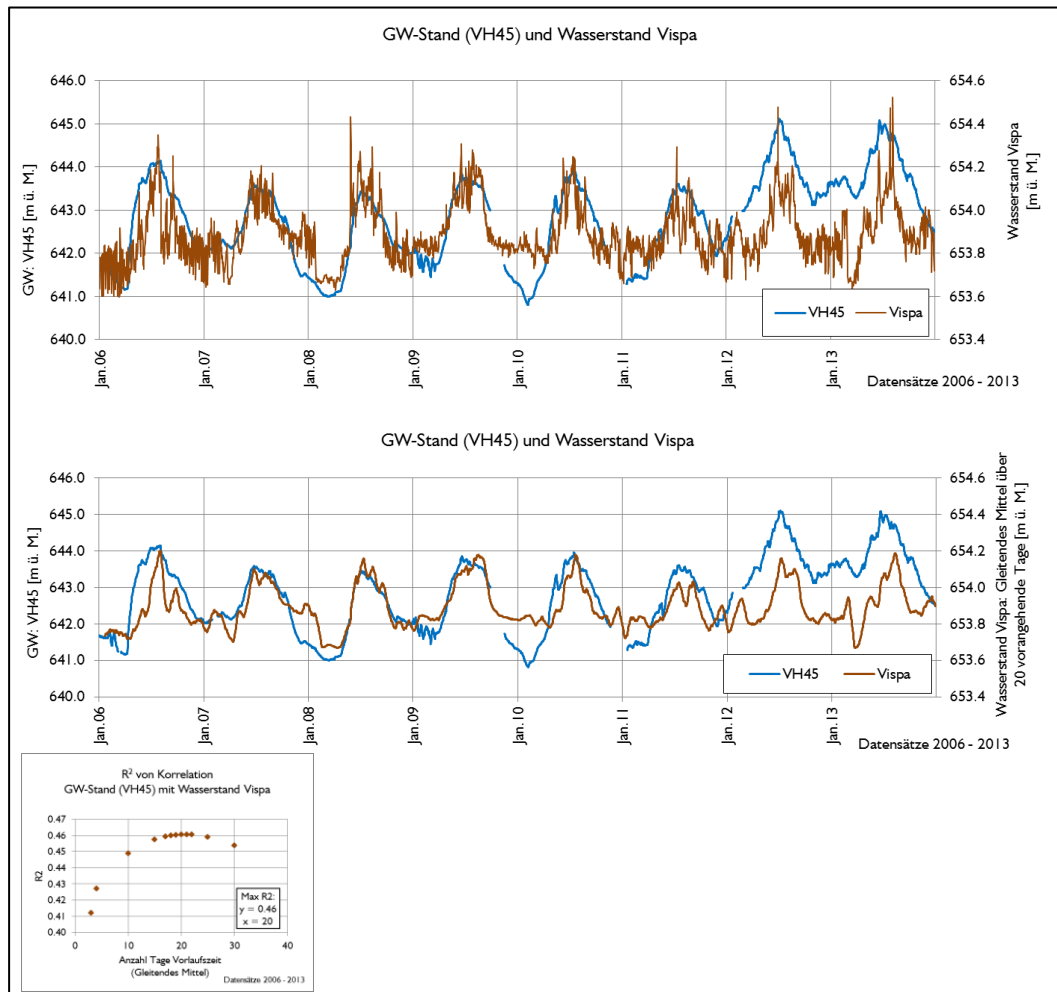


Abbildung 31 Pegelstände Vispa und Grundwasser im Vergleich

Auch wenn die Pegelstände der Vispa einen gewissen Einfluss auf die GW-Stände im Ortszentrum von Visp ausüben, zufriedenstellend ist die Beziehung zwischen den beiden Datensätzen nicht. Wie die vorangehenden Abschnitte aufzeigen, ist das Schwankungsverhalten bei der Messstelle VH45 von „zu vielen“ anderen Faktoren beeinflusst. Diese sind:

- Förderregime der Lonza-Fassungen
- Bergwasserzuflüsse (wobei sich die Signalübertragung am besten mit der anfallenden Menge an Schneeschmelzwasser erklären lässt)
- Profilverfluss bei Lalden (der wiederum vermutlich hauptsächlich von den Bergwasserzuflüssen abhängig ist)

Zusammengefasst dürfte der aussergewöhnlichen GW-Anstieg in den Jahren 2012/2013 zu rund 10-15% durch den Pegelstand der Vispa und zu <10% durch denjenigen der Rhone bewirkt worden sein.

6.8 Zusammenfassung der massgebenden Prozesse, welche die GW-Anomalie 2012/2013 verursachten

In Abbildung 32 werden die massgebenden Prozesse, welche zur GW-Anomalie in den Jahren 2012 und 2013 führten, zusammengefasst. Ausgeklammert bleiben der Profilzufluss Lalden bzw. die im Zuflussbereich dieser Systemgrenze sich abspielende Prozesse. Die methodische Grundlage zu Darstellung der abgebildeten Ganglinie geht aus Kapitel 5.3 hervor.

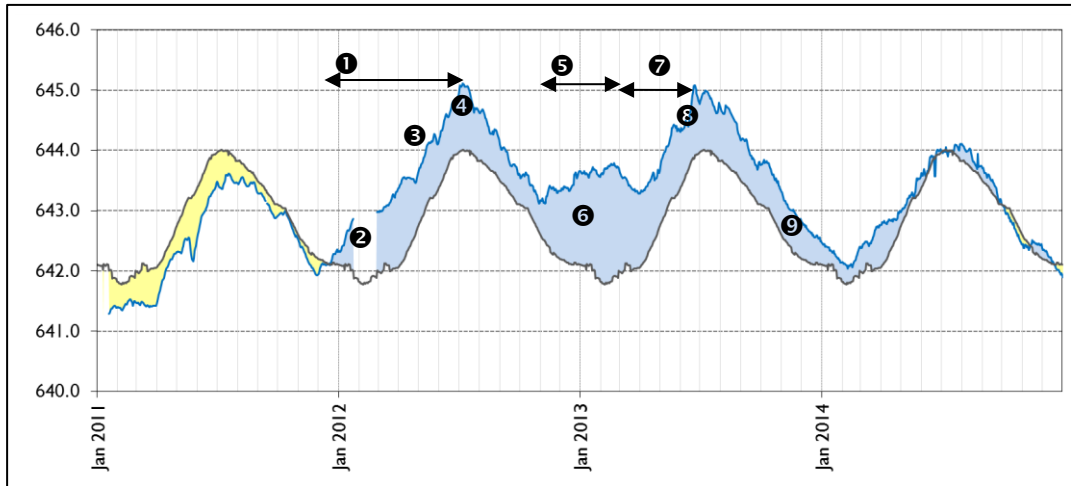


Abbildung 32 Prozesse, die im Ortszentrum von Visp zur Grundwasser-Anomalie 2012/2013 führten

Erläuterungen:

Datenbasis: Tagesmittel der Referenzmessstelle VH45

❶ Per Ende 2011 setzen die ersten Schneeschmelzen im höher gelegenen Einzugsgebiet ein. Diese nehmen fortlaufend zu, erreichen sehr hohe Werte (SWE_{kumuliert}) und beeinflussen Menge und Variabilität der unterirdischen Bergwasserzuflüsse.

❷ Der in tieferen Lagen fallende Regen (oder Schnee, welcher innert weniger Tage schmilzt) bewirkt eine zweifache Signalübertragung: Erstens nimmt die direkte Grundwasserneubildung durch vertikal versickerndes Meteorwasser zu, zweitens führen Abflusspeaks der Vispa zu verstärkter Infiltration. Hinweis: bei der Ganglinie VH45 liegt zum fraglichen Zeitpunkt eine Datenlücke vor, die entsprechenden Anstiege sind bei umliegenden Messstellen deutlich erkennbar.

❸ Die Lonzafassungen fördern rund 20% weniger Grundwasser als in den entsprechenden Vorjahresperioden. Dem Grundwasserleiter wird dadurch weniger Wasser entzogen als „üblich“, was den natürlichen Anstieg akzentuiert.

❹ Ein Regenereignis lässt die Vispa, deren Pegelstand ohnehin schon über dem regulären Sommerniveau liegt, kurzfristig anschwellen. In Kombination mit der direkten Grundwasserneubildung durch versickerndes Regenwasser erreicht das Grundwasser in VH45 am 7. Juli 2012 den historischen Höchststand.

❺ Die kumulierten Schmelzwassermengen weisen in den Wintermonaten 2012/2013 eine für die Jahreszeit hohe Rate auf, weshalb die Bergwasserzuflüsse nicht aufs reguläre Minimum zurückgehen.

❻ Mehrere aufeinander folgende Niederschlagsereignisse tragen wiederum zu einer verstärkten direkten Grundwasserneubildung und zu Abflusspeaks der Vispa bei (erhöhte Infiltration).

❼ Die Schneeschmelze (kumulierte SWE-Werte) erreicht erneut hohe Werte, womit die unterirdischen Bergwasserzuflüsse verstärkt ausfallen.

❽ Auf Weisung der Gde. Visp steigert die Lonzafassungen die Entnahmen aus ihren Fassungen. Damit kann verhindert werden, dass die Grundwasserstände im Raum Visp über das Niveau vom Sommer 2012 ansteigen. Die Messstellen ausserhalb des Einflussbereichs der Lonzafassungen weisen 2013 noch höhere Spitzenwasserstände auf als im Sommer 2012.

❾ Die meteorologischen Verhältnisse im Einzugsgebiet normalisieren sich. Die Grundwasserstände gehen allmählich wieder aufs normale Niveau zurück.

Abbildung 33 zeigt die Abweichung des Grundwasserstandes im Ortszentrum von Visp vom langjährigen Jahresgang (Norm) am 7. Juli 2012 und gewichtet die diversen Einflussfaktoren, welche diese „Anomalie“ verursachten.

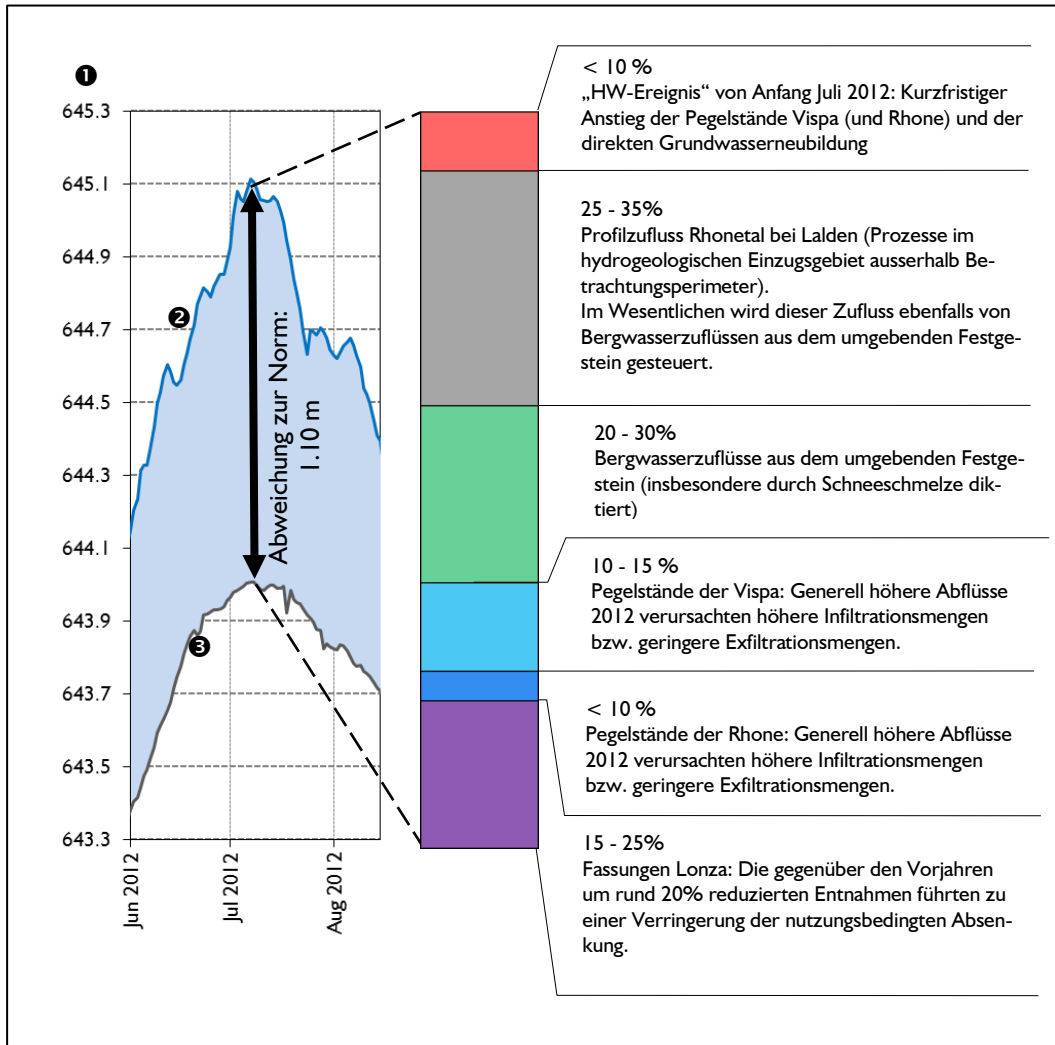


Abbildung 33 Gewichtung der Einflussfaktoren, die zum ungewöhnlichen GW-Anstieg führten, am Beispiel des Höchststandes Sommer 2012 im Ortszentrum von Visp

Erläuterungen:

- ❶ Schwankungsverhalten VH45 (Messstelle im Ortszentrum von Visp), Gesamtdarstellung siehe Kapitel 5.3.
- ❷ Effektiver Jahresgang 2012
- ❸ Langjähriger Jahresgang (Norm)

7 Weitere Prozesse mit Einfluss aufs Schwankungsverhalten des Grundwassers

7.1 Profilzufluss Staldbach

Der Profilzufluss Staldbach stellt die Systemgrenze im hinteren Vispertal dar. Der Zufluss ist Schwankungen unterworfen. Diese dürften die Grundwasserstände im näheren Abstrombereich – wie beispielsweise in der Fassung Katzenhaus – unweigerlich beeinflussen. Angesichts der sehr geringen Zuflussmengen (im Mittel 7.8 l/s bzw. 2% der Gesamtzuflüsse) kann aber ein direkter Zusammenhang zu den Grundwasserständen im Ortszentrum von Visp ausgeschlossen werden.

7.2 Kanäle und Drainagen

Kanäle mit drainierender Wirkung und landwirtschaftliche Drainagesysteme dämpfen das natürliche Grundwasser-Schwankungsverhalten. Durch die künstlich erzeugte Exfiltration werden bei Hochwassersituationen die „Spitzen“ gebrochen. Der Einfluss dieser Systeme wurde im Rahmen dieser Studie nicht untersucht, d.h. Kanäle und Drainagen sind nicht im numerischen Grundwassermodell als Drainageknoten implementiert. Im Hinblick auf die Weiterverwendung des Modells dürfte in Abhängigkeit der Fragestellung das Einfügen der „Nebengewässer“ von Nutzen sein.

7.3 Einbauten ins Grundwasser und andere Bautätigkeiten

7.3.1 Einbauten gemäss Inventar der Gemeinde Visp

Um mit dem numerischen GW-Modell den Einfluss von Einbauten ins Grundwasser simulieren zu können, erstellte die Bauverwaltung der Gemeinde Visp ein Inventar der Gebäude mit einem oder mehreren Untergeschossen. Für die Modellberechnungen wurde von der Annahme einer durchschnittlichen Untergeschosstiefe von drei Metern ausgegangen. Die Differenzen der Grundwasserstände zwischen „Berücksichtigung“ und „Weglassen“ dieser Einbauten kann lokal bis zu 0.20 m betragen. Bezogen auf die gesamten Strömungsverhältnisse sind sie im gegenwärtigen Ist-Zustand als vernachlässigbar zu bezeichnen (bei der Referenzmessstelle VH45 beläuft sich die Spiegeldifferenz auf 0.05 m). Wir verweisen darauf, dass Pfahlfundationen nicht inventarisiert und deren Einfluss somit nicht berechnet wurde. Analog zur o.g. Aussage bzgl. Kanäle und Drainagen lassen sich auch Pfähle in einer weiteren Modellphase implementieren.

7.3.2 Grossbaustellen im zeitlichen Kontext

Die Ursachen der ausserordentlichen GW-Anstiege in den Jahren 2012 und 2013 sind auf überregionale Einflüsse zurückzuführen (vgl. beispielsweise Kapitel 5.6). Aufgrund dessen wurde darauf verzichtet, die Bautätigkeiten bei Grossbaustellen auf deren Grundwasserrelevanz zu prüfen. Wie aus Abbildung 34 hervorgeht, passen die Zeitfenster dieser Tätigkeiten im Allgemeinen nicht mit dem Zeitfenster der GW-Anomalie von Visp zusammen.

	≤2009	2010	2011	2012	2013	2014	≥2015
„GW-Anomalie“ Visp							
A9, Bau der Brücken Staldbach und Felsabtrag	<2009						
A9, Tunnel Visp (Ausbruch, mehrere Röhren)							
A9, Tunnel Eyholz (Ausbruch, beide Röhren)							
A9, Grundwasserabsenkung Schwarzer Graben							
A9, Sanierung/Verschiebung Grossgrundkanal							
A9, Baustelle Grosseya (Spundwände, Wasserhaltungen, Aushub)							
A9/R3, Pfählungsarbeiten Brücke Vispa A9							
A9/R3, Pfählungsarbeiten Brücke Rhone A9							
R3, Wasserbau: Erstellung Schmalwand, Bereich nördlich von Visp							
R3, Wasserbau: Abtrag Vorland/Blocksatz Bereich Grossgrund							
R3, Wasserbau: Abtrag Vorländer, Blocksatz inkl. Voraushub ca. 2.0 m unter Sohle, Bereich nördlich von Visp							
R3, Dammbau, Drainageschlitze im Bereich Lalden							
R3, Mikropfähle und Spundwände Landbrücke							
Pfahlgründungen Lonza (insgesamt mehr als 5'200 Einzelpfähle)							

Abbildung 34 Grundwasserrelevante Tätigkeiten bei Grossbaustellen im Raum Visp

Wir verweisen auf die Komplexität der Grundwasserverhältnisse im Raum Visp. Bei natürlich bedingten ungewöhnlich hohen Anstiegen im ersten Kalenderhalbjahr mit Höchstwasserständen in den Monaten Juni/Juli kann „jeder Dezimeter“ darüber entscheiden, ob es im Siedlungsgebiet von Visp wegen Grundwasserzutritten in Untergeschossen zu Schäden kommt. Dementsprechend hoch müssen die Anforderungen an die mandatierten Umweltbaubegleitungs-Teams der Grossbaustellen sein, welche u.a. die Grundwasserverhältnisse überwachen (vgl. auch Kapitel 8.7).

8 Zukunftsprognosen und Empfehlungen zur Grundwasserbewirtschaftung im Raum Visp

8.1 Resümee

Die Ergebnisse der „Detailuntersuchung – Grundwasserproblematik Visp“ dienen der Erarbeitung eines konkreten Aktionsplans zur Grundwasserbewirtschaftung im Raum Visp (welcher nicht Gegenstand der vorliegenden Studie ist). Vorausblickend erwähnen wir deshalb nur einige wesentliche Punkte, die berücksichtigt werden müssen.

8.2 Intensivierung der Forschung „Prozesse der Gebirgs-GW-Neubildung und die Fortpflanzung von GW-Druckschwankungen im alpinen Raum“

Der operationelle schneehydrologische Dienst (OSHD) am Institut für Schnee- und Lawinenforschung (SLF) analysiert laufend die Schneewasserressourcen in der Schweiz [28]. Hierbei erlaubt das Snow-Water-Equivalent-Konzept (SWE) die Berechnung der Schneeschmelzraten. Die vorliegende Studie zeigt, dass diese Daten wesentlich zum Verständnis der komplexen Grundwasser-Prozesse im Gebirge beitragen. Die durchgeführten Auswertungen weisen jedoch nur einen „initialen Charakter“ auf. Die Forschung in diesem Gebiet muss intensiviert werden. Der Kanton Wallis leistet diesbezüglich Pionierarbeit. Die bereits bestehende Zusammenarbeit zwischen DUS, CREALP und CHYN zur hydrogeologischen Erkundung von Gebirgssystemen soll weitergeführt werden. Eine Mitwirkung des SLF wäre wünschenswert. Ziel solcher Arbeiten sollte sein, die Rolle des Gebirgskörpers beim Grundwasserhaushalt besser verstehen und quantifizieren zu können.

8.3 Klimaveränderungen

Die aktuellen, für die Schweiz geltenden Prognosen zur möglichen Klimaentwicklung gehen von einer Zunahme der Winterniederschläge und von einem Rückgang der Sommerniederschläge aus. Der prognostizierte Temperaturanstieg in diesem Jahrhundert ist mehr als doppelt so hoch wie der gemessene des letzten Jahrhunderts. Die Abhängigkeit der Grundwasserstände in Visp von den meteorologischen Bedingungen im höher gelegenen Einzugsgebiet lässt die Folgerung zu, dass die prognostizierten Klimaveränderungen eher zu einer Häufung von Grundwasserhöchstständen, wie sie in den Jahren 2012 und 2013 beobachtet wurden, führen werden. Höhere Schneedecken im Winter mit kürzer werdender Schmelzperiode im Frühsommer dürften die Signalübertragung von Berggrundwasserschwankungen auf die Lockergesteinsgrundwasservorkommen des Vispertals und Rhonetals akzentuieren.

Wir verweisen auf das Forschungsprogramm NFP 61 „Nachhaltige Wassernutzung“ [29], welches unter anderem den Themenkreis Grundwasser behandelt. Die darin gemachten Aussagen beziehen sich allerdings in erster Linie auf die Verhältnisse im schweizerischen Mittelland.

8.4 Weiternutzung des numerischen Grundwassermodells

Die Forderungen an die Grundwassermodellierung gemäss Pflichtenheft zur Detailuntersuchung „Grundwasserproblematik Visp“ lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- 1) Numerische Nachbildung der in den Jahren 2012/2013 beobachteten Hochwasserstands-Anomalie im Ortszentrum von Visp;
- 2) generelle Erweiterung des Verständnisses über die hydrogeologischen Gegebenheiten im Raum Visp.

Die open-source Software iMOD [7] [8] hat sich als effizientes Datenmanagement- und Modellierungstool erwiesen; zahlreiche Szenarien konnten im Rahmen der vorliegenden Studie berechnet werden. Mehrere davon dienten der Quantifizierung der Prozesse, welche die GW-Anomalie massgebend verursacht haben.

Ein grosser Vorteil der Modellierung mit iMOD liegt in der Möglichkeit, komplexe heterogene Datensätze über verschiedene Auflösungen und über einen beliebig ausgedehnten Raum „flexibel“ und „schnell“ bearbeiten zu können. Ausgehend vom Basismodell ist iMOD auch in der Lage, einzelne Teilgebiete mit höherer Auflösung zu generieren bzw. den Modellperimeter beliebig zu erweitern. Die Software iMOD ist nicht nur für Fragen um die Grundwasserbewirtschaftung einsetzbar, sie eignet sich auch als Werkzeug für den Vollzug gewässerschutzrechtlicher Belange im grossräumigen Kontext.

Deltares hat die Modelldaten der instationären Berechnung fürs Grundwassergebiet von Visp inkl. Modell-Code dem DUS zugestellt. Die Verknüpfung mit der Datenbank REGIS ist sicherzustellen. Idealerweise könnte das Modell direkt durch den Kanton für folgende Fragestellungen weiterverwendet werden:

- Grundwassermanagement in der Agglomeration Visp-Naters-Brig (Zusammenarbeit mit den betroffenen Gemeinden);
- Dynamisches Monitoring allfälliger Auswirkungen der Grossbauprojekte R3 und A9 auf die Grundwasserverhältnisse;
- Implementierung des Modells als Hilfeleistung bei den laufenden Altlastenuntersuchungen;
- Zeitliche Verfolgung von Klimawandel-bezogenen Auswirkungen auf die regionale Grundwasserdynamik (Verbindung zwischen den kantonalen „Grundwasser-Berg- und -Talmessnetze“).

8.5 Abhängigkeit vom Entnahme-Regime der Lonza

Die ungewöhnlichen GW-Anstiege 2012/2013 weisen einen überregionalen Charakter auf und sind somit nicht auf lokale Eingriffe zurückzuführen. Zusätzlich werden die Grundwasserstände grossräumig durch die GW-Nutzungen der Lonza beeinflusst. Verstärkte Entnahmen im Frühjahr/Frühsummer dämpfen die natürlichen GW-Anstiege in dieser Jahreszeit. Beängstigend ist, dass die Grundwasserstände im Ortszentrum von Visp bei kompletter Ausserbetriebnahme der Lonza-Fassungen gemäss Modellberechnung um 0.6 bis 1.6 m ansteigen würden. Eine intensive Zusammenarbeit zwischen Gemeinde und Lonza AG im Bereich Grundwasserbewirtschaftung wird dadurch zur Pflicht. Hier eine erste Auswahl der zu berücksichtigenden Aspekte:

- Gemeinsames Verständnis der Risiken für die öffentliche Sicherheit;
- Entwicklung von Förderregime-Strategien in Abhängigkeit des GW-Verhaltens;
- Festlegen von minimalen Pumpraten (v.a. für die sensiblen Monate Mai bis Juli);
- Datenmanagement: Sicherstellung einer lückenlosen Erhebung der Fördermengen in den einzelnen Brunnen inkl. Datentransfer zur Bauverwaltung der Gde. Visp¹⁰
- allfällige Anpassungen des GW-Messstellennetzes.

8.6 Festlegung repräsentativer Bemessungswasserspiegel für Baubewilligungen

Einbauten unter den mittleren Grundwasserspiegel sind im Gewässerschutzbereich A_u grundsätzlich verboten. Die Behörde kann Ausnahmen bewilligen, soweit die Durchflussskapazität des Grundwassers gegenüber dem unbeeinflussten Zustand um höchstens zehn Prozent vermindert wird.

Einbauten über dem mittleren Grundwasserspiegel sind somit bewilligungsfähig. Allerdings liegt es im Interesse der Bauherren, Massnahmen zur Verhinderung von Wasserzutritten bei Hochwasserständen vorzusehen (dichte Bauweise, Umlaufdrainagen etc.).

Die in den Jahren 2012 und 2013 aufgetretenen Schäden und der zunehmende Siedlungsdruck erfordert die Bereitstellung repräsentativer Bemessungswasserspiegel als Grundlage für Baubewilligungen. Die Berechnung von Grundwasserspiegeln (mit Fokus MW- und HW-Spiegel) ist angesichts des Einflusses der Lonza-Fassungen keine triviale Aufgabe. Vorderhand empfehlen wir, je zwei Isohypsenpläne zu erstellen: Einerseits mit der Datenlage Ist-Zustand (d.h. Lonza-Fassungen in Betrieb), andererseits unter Weglassung des Einflusses durch die genannten Nutzungen (worst-case-Szenario). Zwecks Generierung einer homogenen Datengrundlage ist das Messstellennetz vor allem südlich der SBB-Bahnlinie zu verdichten (gegenwärtig wird das Ortszentrum einzig durch die Messstelle VH45 abgedeckt). Zur Berechnung der natürlichen, nicht beeinflussten Grundwasserstände stellt das Grundwassermodell Visp ein hilfreiches Werkzeug dar.

¹⁰ Gemäss Mittelung DUS gelte die Aufzeichnungspflicht auch für die in oberirdische Gewässer eingeleiteten Wassermengen (nicht Gegenstand der vorliegenden Untersuchungen).

8.7 Sensibilisierung der Umweltbaubegleitungen von Grossbaustellen im Raum Visp

Die umwelt- und gewässerschutzrelevante operationelle Überwachung der Grossbaustellen A9 und dritte Rhonekorrektur obliegt den entsprechenden Umweltbaubegleitungen. Diese sind auf die im vorliegenden Bericht dargelegten Ergebnisse zu sensibilisieren. Fallweise sind in Absprache mit der Bauherrschaft zusätzliche zu den ohnehin schon vorgesehenen Massnahmen anzuordnen, um temporäre oder anhaltende Anstiege des Grundwasserspiegels einzudämmen.

8.8 Zusammenarbeit zwischen der Gemeinde Visp und den kantonalen Fachstellen

Grundwasser ist ein öffentliches Schutzgut. Im Kanton Wallis liegt die Sachherrschaft (das „Eigentum“) der Grundwasservorkommen bei den Gemeinden. Deshalb sind es die Gemeinden, die GW-Nutzungsrechte verleihen, beispielsweise in Form von Konzessionen oder Bewilligungen. Der Kanton ist im Rahmen der hoheitlichen Schutzaufsicht zuständig für den Vollzug des Grundwasserschutzes¹¹, der gemäss Gewässerschutzgesetzgebung auch die Erarbeitung und Bereitstellung von Grundlagen beinhaltet.

Die vorliegende Studie veranschaulicht die Verknüpfung von Datensätzen unterschiedlicher Herkunft (Bund, Kanton, Gemeinde, vgl. Tabelle 2). Die behandelten Themen tangieren sowohl Zuständigkeitsbereiche der Gemeinde als auch solche des Kantons. Mit Recht waren Kanton und Gemeinde in der Projektorganisation vertreten (Tabelle 1). Der Gemeinde Visp wird empfohlen, die Zusammenstellung von weiterführenden Planungsinstrumenten und Entscheidungshilfen im Sinne eines *konkreten Aktionsplans zur Grundwasserbewirtschaftung im Raum Visp* mit Unterstützung des Kantons zu entwickeln.

GEOTECHNISCHES INSTITUT AG

¹¹ Einzelne Aufgaben werden allerdings wiederum an die Gemeinden delegiert.

9 Verzeichnis der zitierten Grundlagen

- [1] Rovina + Partner AG, *Hohe Grundwasser-Stände in Visp seit Dezember 2011: Hydrogeologische Ursachenanalyse*, Varen, 26.6.2013.
- [2] Kt. Wallis, Dienststelle für Umweltschutz (DUS), Sektion Gewässerschutz, *Grundwasserproblematik Visp - Detailuntersuchung: Offizielle Mitteilung (Pflichtenheft, Vertragsabschluss und Kostenbeteiligungskonvention)*, Sitten, 2013.
- [3] Geotechnisches Institut AG, *Aktennotiz Nr. 1: Die hohen Grundwasserstände von 2012 im langjährigen Kontext*, Bern: Sitzungsunterlage z.Hd. Projektteam, 8.4.2014.
- [4] Geotechnisches Institut AG, *Aktennotiz Nr. 2: Die hohen Grundwasserstände von 2012 im regionalen Kontext und im Vergleich zu den Wassersänden der Vispa*, Bern: Sitzungsunterlage z.Hd. Projektteam, 7.5.2014.
- [5] Geotechnisches Institut AG, *Aktennotiz Nr. 3: Diverse Auswertungen zur Ermittlung relevanter Einflussgrößen*, Bern: Sitzungsunterlage z.Hd. Projektteam, 10.10.2014.
- [6] Geotechnisches Institut AG, *Aktennotiz Nr. 7: Einfluss der Schneeschmelze und des Pegelstands der Vispa auf die GW-Stände in Visp*, Bern: Sitzungsunterlage z.Hd. Projektteam, 19.6.2015.
- [7] P. Vermeulen und B. Minnema, *iMOD user manual. Version: 3.01*, Utrecht: Deltares, 2015.
- [8] P. Vermeulen, *Groundwater Flow Model Visp*, Utrecht: Deltares, Oktober 2015.
- [9] Geotechnisches Institut AG, *Grundwasserproblematik Visp: Modellkonzept*, Bern, 2015.
- [10] Geotechnisches Institut AG, *Aktennotiz Nr. 6: Numerisches Grundwassermodell (Beschlussprotokoll)*, Bern, 2015.
- [11] P. Vermeulen, *Pers. Mitteilung (Mail mit Ergebnis der nachbestellten Simulation)*, Utrecht: Deltares, 2.2.2016.
- [12] OSPAG, Odilo Schmid & Partner AG, *Grundwasserüberwachung Chatzuhüs / Staldbach, Zwischenbericht Dezember 2013*, Brig-Glis: Ingenieurmandat Südumfahrung Tunnel Visp, 13.12.2013.
- [13] Prof. R.F. Rutsch, *Filterbrunnen Katzenhaus: Geologisches Profil und technischer Ausbau*, Bern: Auftraggeber: Wasserversorgung der Gde. Visp, 1972.
- [14] Odilo Schmid, Büro für beratende Geologie, *Geologische Querprofile*, Brig: Beilagen aus: Messquerschnitt Geotechnik, 3. Rottenkorrektur, Abschnitt Brig-Stusten, Auswertung 2000, Februar 1999.
- [15] Swiss Seismological Service, „COGEAR-Projekt,“ 2015. [Online]. Available: <http://www.cces.ethz.ch/projects/hazri/COGEAR>.
- [16] BEG, Bureau d'Etudes Géologiques SA, *Projet COGEAR - Réalisation de 5 forages sismiques. Rapport de suivi environnemental.*, Aproz, 26.3.2015.
- [17] S. Volken, *pers. Mitteilung*, Landesgeologie, swisstopo, Wabern, 25.2.2016.
- [18] A. Rosselli und R. Olivier, „Modélisation gravimétrique 2.5D et cartes des isohypses au 1:100'000 du substratum rocheux de la Vallée du Rhône entre Villeneuve et Brig,“ *Eclogae geol. Helv.* 96, pp. 399-123, 2003.
- [19] Odilo Schmid, *Grundwasserschutz zonen für die Grundwasserfassungen im Einzugsgebiet*

der Vispa, Brig: Gemeinde Visp, 1984.

- [20] M. Schürch, R. Kozel, D. Biaggi und R. Weingartner, *Typisierung von Grundwasserregimen in der Schweiz*, Gas Wasser Abwasser GWA, 2010.
- [21] S. Bader und H. Bantle, *Das Schweizer Klima im Trend: Temperatur- und Niederschlagsentwicklung 1864 - 2001*, Zürich: MeteoSchweiz, 2004.
- [22] C. Strasser und D. Biaggi, *Beeinflussung von Grundwasserständen durch Winterniederschläge im langjährigen Vergleich*, Bern: Amt für Wasser und Abfall des Kantons Bern (AWA), 2008.
- [23] T. Jonas, *Monitoring von Schneewasserressourcen in der Schweiz*, WLS, Davos: Forum für Wissen 2012: 7-12, 2012.
- [24] Canton du Valais, *Gestion des sources de montagne. Rapport technique.*, Sion: Programme Opérationnel de Coopération Transfrontalière Italie-Suisse, INTERREG, Projet STRADA-Action 3, 2014.
- [25] N. Griessinger, pers. Mitt., WSL Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, 16.12.2015.
- [26] M. Cochand, *De la neige au torrent: étude sur lde stockage de l'eau de fonte nivale en milieu alpin: Vallon de Réchy, Valais*, Neuchâtel: CHYN (Master), 2014.
- [27] S. Degli Agosti, *A la naissance des sources. Etude hydrogéologique dans un milieu alpin. Vallon de Réchy, Valais, Suisse*, Neuchâtel: CHYN (Master), in prep..
- [28] WSL - Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF, „Operationelle schneehydrologische Modelle des SLF,“ [Online]. Available: http://www.wsl.ch/fe/gebirgshydrologie/schnee_hydro/oshd/methods_DE. [Zugriff am 29 02 2016].
- [29] Schweizerischer Nationsfonds zu Förderung wissenschaftlicher Forschung, „NFP 61: Nachhaltige Wassernutzung,“ [Online]. Available: <http://www.nfp61.ch/de>. [Zugriff am 29 02 2016].
- [30] Geographisches Institut der Universität Bern, *Hydrologischer Atlas der Schweiz*, Bern: Bundesamt für Umwelt, BAFU, 2010.
- [31] Website Wetterstation Sedrun (www.wetter-sedrun.ch) , *Schneedaten*, Sedrun: Hosting: Hostfactory (OptimaNet AG, Seuzach), Stand November 2015.
- [32] T. Jonas, C. Marty und J. Magnusson, „Estimating the snow water equivalent from snow depth measurements in the Swiss Alps,“ *Journal of Hydrology*, 378, pp. 161 - 167, 2009.