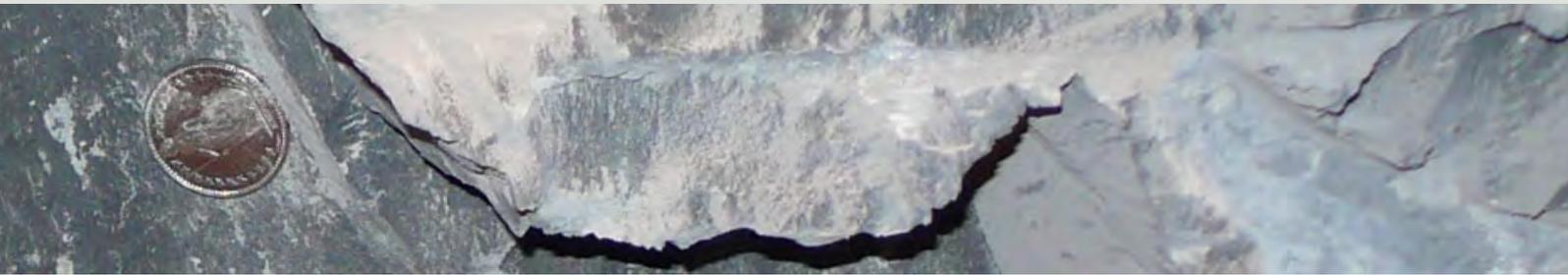




Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI  
Inspection fédérale de la sécurité nucléaire IFSN  
Ispettorato federale della sicurezza nucleare IFSN  
Swiss Federal Nuclear Safety Inspectorate ENSI



# Standortgebiete: Prüfung der Grundwasserverhältnisse im Hinblick auf die bautechnische Erschliessung

Expertenbericht

im Rahmen der Beurteilung des Vorschlags geologische Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager,  
Etappe 1, Sachplan geologische Tiefenlager

Dr. von Moos AG

Dezember 2009

# 8600-2

Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI, 5232 Villigen

## Sachplan Geologische Tiefenlager (SGT) Etappe 1:

### **STANDORTGEBIETE: PRÜFUNG DER GRUNDWASSERVERHÄLTNISSE IM HINBLICK AUF DIE BAUTECHNISCHE ERSCHLIES- SUNG**

Expertenbericht zuhanden des  
Eidgenössischen Nuklearsicherheitsinspektorates ENSI

Zürich, 8. Dezember 2009

Bericht Nr. 8600-2

**Dr. von Moos AG**

Geotechnisches Büro

**Beratende Geologen und Ingenieure**

Bachofnerstrasse 5

T. 044 363 31 55/ F. 044 363 97 44

www.geovm.ch info@geovm.ch



8037 Zürich

## Inhaltsverzeichnis

1.	Auftrag und Unterlagen	3
2.	Allgemeines	4
3.	Standortspezifische Betrachtungen	6
3.1	HAA + SMA Bözberg (AG)	6
3.2	HAA + SMA Nördlich Lägern (ZH, AG)	6
3.3	HAA + SMA Zürcher Weinland (ZH TG)	6
3.4	SMA Jura Südfuss	7
3.5	SMA Südranden (SH)	7
3.6	SMA Wellenberg (NW, OW)	8
4.	Schlussbemerkungen	

## Anhang

A1	Hydrogeologische Sammelprofile der SMA-Standortgebiete
A2	Hydrogeologisches Sammelprofil durch das Standortgebiet Wellenberg
A3	Hydrogeologische Sammelprofile durch die HAA-Standortgebiete

# 1. Auftrag und Unterlagen

Auftraggeber: Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI, 5232 Villigen

Vertragsgrundlagen: Vertrag vom 16.5.2008 (H-100542)

Offerte vom 24. April 2008

Im Rahmen der Etappe 1 des Sachplanverfahrens geologische Tiefenlager (SGT) erarbeitete die Nagra Vorschläge für geologische Standortgebiete für ein SMA- respektive ein HAA-Lager (NTB 08-03). Der vorliegende, im Auftrage des Eidgenössischen Nuklearsicherheitsinspektorats ENSI erstellte Bericht erörtert die verschiedenen Standortgebiete in hydrogeologischer Hinsicht im Hinblick auf deren bautechnische Erschliessung. Zuerst werden einige Erwägungen allgemeiner Natur vorgestellt, dann folgen standortspezifische Überlegungen. Der Fokus wird dabei auf die Eigenschaften der Nebengesteine im Bereich der Zugangsstollen gelegt, welche aus hydrogeologischer Sicht die grössten Auswirkungen auf die Bautechnik der Lagerzugangsbauten haben; die Eigenschaften der Wirt- und der Rahmengesteine sind im Zuge einer späteren Etappe des Sachplans Geologische Tiefenlager zu behandeln.

Wir stützen uns dabei auf die folgenden Dokumente der Nagra:

Nummer	Titel	Autoren	Datum
NAB 07-28	Geologie und Hydrogeologie der Effinger Schichten im Tafeljura und am Jurasüdfuss.	S. LAWS & G. DEPLAZES mit Beitrag von U. EICHENBERGER & P.-Y. JEANNIN	November 2007
NTB 93-28	Geologische Grundlagen und Datensatz zur Beurteilung der Langzeitsicherheit des Endlagers für schwach- und mittelaktive Abfälle am Standort Wellenberg.	Nagra	September 1993
NTB 96-01	Geosynthese Wellenberg 1996, Ergebnisse der Untersuchungsphasen I und II. – Text- und Beilagenband.	Nagra	September 1997
NTB 08-03	Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager: Darlegung der Anforderungen, des Vorgehens und der Ergebnisse (sog. "Einengungsbericht").	Nagra	Oktober 2008
NTB 08-04	Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager: Geologische Grundlagen, Text- und Beilagenband.	Nagra	Oktober 2008
–	Sachplan geologische Tiefenlager Etappe 1, SGT-VO, Sammelprofile zu geotechnischen und hydrogeologischen Verhältnissen in überlagernden Gesteinsformationen.	Nagra	Mail ENSI 12. Mai 2009

Weitere, zitierte Unterlagen:

<b>Autoren</b>	<b>Titel</b>	<b>Jahr</b>
DREYBRODT W., GABROVSEK F. & ROMANOV D.	Karstification below Dam Sites. – in: DREYBRODT W., GABROVSEK F. & ROMANOV D. (Ed.): Processes of Speleogenesis – a Modeling Approach. – Carsologica 4: 258-278. – Karst Research Institut at ZRC SAZU, Ljubljana.	2005
LOWE D.J.	Role of Stratigraphic Elements in Speleogenesis – The Speleoception Concept. – in: KLIMCHOUK A.B., FORD D.C., PALMER A.N. & DREYBRODT W. (Ed.): Speleogenesis – Evolution of Karst Aquifers. – National Speleological Society, Huntsville (Alabama, USA): 65-76.	2000
LOWE D.J., BOT- RELL S.H. & GUNN J.	Some Case Studies of Speleogenesis by Sulfuric Acid. – in: KLIMCHOUK A.B., FORD D.C., PALMER A.N. & DREYBRODT W. (Ed.): Speleogenesis – Evolution of Karst Aquifers. – National Speleological Society (Huntsville, Alabama, USA): 304-308.	2000

## 2. Allgemeines

Es werden hier nur die Formationen im Hangenden des Wirtgesteins und der Rahmengesteine in Betracht gezogen, da nur diese bei der Erschliessung, beim Bau und beim Betrieb eines Tiefenlagers von hydrogeologischer Relevanz sind. Weggelassen sind in der jetzigen Untersuchungsetappe und im vorliegenden Expertenbericht auch die heterogenen quartären Aquifere, von denen angenommen werden kann, dass sie technisch beherrschbar sind oder – sofern nötig – bei der Erschliessung umgangen werden können.

Unterhalb dem Vorflutniveau sind die verschiedenen Aquifere gesättigt. In Abhängigkeit der Durchlässigkeit und der Durchflussmenge kann der Bergwasserspiegel auch höher als die Vorflut liegen. Bei der Vorflut handelt es sich generell um Talböden oder um Lockergesteinsgrundwasserträger. Eine allfällige Verkarstung von Kluftaquiferen reicht mindestens bis auf das Vorflutniveau, in bekannten Beispielen aber auch mehrere Dutzend bis mehrere hundert Meter darunter. Bei reaktiviertem Paläokarst – z.B. im Grenzbereich Malm - Tertiär – kann ein Karstsystem auch in grösserer Tiefe von Bedeutung sein.

Wie in LAWS et al. (2007) betont wird, ist die Geschwindigkeit der Verkarstung stark vom Gradienten abhängig. Durch die Wasserhaltung beim Bau und dem Betrieb eines Tiefenlagers entstehen lokal sehr grosse Gradienten. DREYBRODT et al. (2005) konnten in Modellrechnungen im Falle von Dammbauten – eine bezüglich Gradienten mit einem während Bau und Betrieb drainierten Tiefenlager vergleichbare Konstellation – aufzeigen, dass die Durchbruchzeiten<sup>1</sup> bei vorexistierenden Kluftnetzen in dieser Situation statt Jahrtausende nur wenige Jahrzehnte betragen können. Unseres Erachtens ist die Bedeutung dieses Phänomens für ein Tiefenlager und allfällige Massnahmen hinsichtlich der spezifischen Standortgeologien noch eingehend zu hinterfragen.

---

Durchbruchzeit = Zeitdauer zwischen Beginn des Durchflusses und starker Steigerung des Durchflussvolumens

Im NTB 08-04 wird an verschiedenen Stellen kurz auf Oxidationsprozesse von Sulfiden eingegangen<sup>2</sup> und als praktisch vernachlässigbarer Prozess eingestuft. Zwar ist dieser Prozess effektiv durch das allgegenwärtige Karbonat gepuffert. Die Reaktion geht aber via Schwefelsäure zu Gips, welcher als leicht lösliches Material mobil ist, sodass sich Hohlräume im Gestein entwickeln können (LOWE et al., 2000). Diesem Vorgang entsprechende halbkugelförmige Löcher im Schrattenkalk der Axen-Decke s.l. sind z.B. in den Karrengebieten des Muotatals verbreitet.

LOWE (2000) hat ein Speläogenese-Modell entwickelt, welches erklären kann, weshalb sich Protohöhlungen in gewissen Fugen konzentrieren («Inception Horizon»). Bei diesen Primärfugen handelt es sich häufig um Mergel- oder Tonlagen in Kalk, in denen Pyrit oder Markasit gehäuft vorkommt. Die Oxidation von Sulfiden führt – wie oben dargelegt – zur Bildung von Schwefelsäure, welche das karbonatische Nebengestein angreift. Durch die Drainage des Tiefenlagers und dessen Zugang in der Bau- und Betriebsphase entstehen die Voraussetzungen für eine Oxidation der Sulfide und damit auch der sekundären Porosität im Gebirge. Der Einfluss der Sulfidoxidation auf die Hydrogeologie des Gebirges ist unseres Erachtens nicht ohne weiteres als vernachlässigbar zu betrachten; hier bedarf es noch eingehender Studien, speziell hinsichtlich der Bildungsgeschwindigkeit wie auch des Umfangs der entstehenden Makroporosität.

---

2 S. 137: *Der bedeutenste Oxidationsprozess im Opalinuston betrifft die Oxidation von Pyrit unter Bildung von Sulfat (Gips) und Fe-Hydroxid bei neutralen pH-Bedingungen (System gepuffert durch Calcit-Lösung). Das Ausmass der Oxidation hängt von der Betriebsdauer (Offenhaltung der Lagertunnels und -kavernen) ab.*

S. 149: *Aufgrund der mineralogischen Analogien zum Opalinuston kann davon ausgegangen werden, dass Oxidationseffekte keine signifikanten Auswirkungen auf die Barrierenwirkung der Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' haben.*

S. 169: Wie S. 137, bezogen auf die Effinger Mergel.

S. 185: Wie S. 137, bezogen auf Mergel-Formationen des Helvetikums.

S. 237: *Zur Oxidation der kristallinen Gesteine während der Bau- und Betriebsphase liegen keine Studien vor, weil diese Effekte generell als nicht signifikant eingestuft werden. Die Oxidationsreaktionen laufen – vermutlich wegen der Kristallstruktur der Sulfide und des limitierten Eindringens von Sauerstoff in die Gesteinsmatrix – sehr langsam ab und sind deshalb praktisch vernachlässigbar.*

S. 253: wie S. 237

### 3. Standortspezifische Betrachtungen

Von 15 bevorzugten Bereichen für ein Tiefenlager im Jura liegen Sammelprofile vor (vgl. Anhang A1), vom wesentlich komplizierter aufgebauten alpinen Standort Wellenberg sind umfangreiche Untersuchungsergebnisse in verschiedenen Nagra Technischen Berichten dokumentiert (NTB 93-28, NTB 96-01). Kurze Beschreibungen der vorgeschlagenen Standortgebiete finden sich im NTB 08-03 (Kap. 5.7). Die Herleitung der Namensbezeichnung der potenziellen Standorte ist in der Fussnote<sup>3</sup> aufgelistet.

#### 3.1 HAA + SMA Bözberg (AG)

In diesem Standortgebiet in der Vorfaltenzone nördlich des Faltenjuras liegen die Bereiche HAA-OPA-VZ-W und SMA-OPA-VZ-W. Verkarstung ist hauptsächlich in der Villigen-Formation zu erwarten, welche oberhalb der regionalen Vorflut liegt. Im nördlichen Gebirgstiel könnten allenfalls die Gerstenhübel-Schichten und der Hauptrogenstein eine Verkarstung aufweisen, da diese dort an oder nahe der Oberfläche liegen. Allerdings weisen die allgemein geringen Gradienten eher auf eine wenig ausgeprägte, sekundäre Porosität und somit auf eine Dominanz von Kluftaquiferen.

Langfristig (Zeithorizont bei HAA-Lagern 1 Ma) könnte sich durch den flächigen Abtrag der Hauptrogenstein zum Hauptträger von Karstphänomenen entwickeln. Wesentliche ortsspezifische Probleme hydrogeologischer Natur sind bei der Erschliessung und dem Bau eines Lagers zum jetzigen Zeitpunkt aber nicht erkennbar.

#### 3.2 HAA + SMA Nördlich Lägern (ZH, AG)

Dieses Standortgebiet liegt in tektonisch äquivalenter Position wie die Bereiche am Bözberg. Das Gebiet beinhaltet die Bereiche HAA-OPA-VZ-O, HAA-OPA-VZ-M, SMA-OPA-VZ-O, SMA-BD-VZ-O und SMA-BD-VZ-W. Beim Fels im Bereich der Terrainoberfläche handelt es sich fast durchwegs um Molasse, welche die darunterliegenden Aquifere von der Zirkulation weitgehend abschirmt. In den kalkigen Formationen des Malm (Felsenkalk- und Villigen-Formation) sind deshalb hauptsächlich Kluftaquifere mit beschränkter Durchflusskapazität zu erwarten.

Ein aktiver, aber wenig ausgeprägter Karst könnte am ehesten entlang des Rheins auftreten; längerfristig (Zeithorizont bei HAA-Lagern 1 Ma) könnte dieser Aquifer durch flächige Erosion der Deckschichten entblösst werden und beschleunigt verkarsten. Wesentliche ortsspezifische

---

<sup>3</sup> HAA = hochaktive Abfälle, SMA = schwach- und mittelaktive Abfälle; OPA = Opalinuston, BD = 'Brauner Dogger', EFF = Effinger Schichten, MG = Mergel; VZ = Vorfaltenzone, TJ = Tafeljura, SJ = subjurassisch, HEL = Helvetikum; W = West, M = Mitte, O = Ost, N = Nord, S = Süd

Probleme hydrogeologischer Natur sind bei der Erschliessung und dem Bau eines Lagers zum jetzigen Zeitpunkt aber nicht erkennbar.

### **3.3 HAA + SMA Zürcher Weinland (ZH, TG)**

Dieses Standortgebiet mit den Bereichen HAA-OPA-TJ, SMA-OPA-TJ-S und SMA-BD-TJ wird dem Tafeljura zugeordnet. Die stratigraphischen Verhältnisse sind ähnlich wie in der Vorfaltenzone nördlich der Lägern. Die potenziell verkarsteten, kalkigen Schichten des Malm (Felsenkalk- und Villigen-Formation) sind – ausser entlang dem Rhein – von mächtigen Molasse-Schichten abgedeckt. Eine rezente, aktive Verkarstung ist deshalb dort kaum zu erwarten. Tunnelbauwerke im Raum Schaffhausen zeigten eine weitgehende Versiegelung des Paläokarstes durch Boluston.

Längerfristig (Zeithorizont bei HAA-Lagern 1 Ma) könnten diese Kalke im Nordteil des Gebietes durch die flächige Erosion in den Bereich der Terrainoberfläche respektive der Vorflut gelangen, wo sie verkarsten. Allerdings sind die geringen Gradienten einem solchen Vorgang nicht förderlich. Wesentliche ortsspezifische Probleme hydrogeologischer Natur sind bei der Erschliessung und dem Bau eines Lagers zum jetzigen Zeitpunkt nicht erkennbar.

### **3.4 SMA Jura Südfuss (SO, AG)**

Im subjurassischen Standortgebiet liegen vier potenzielle Lagerbereiche (SMA-OPA-SJ-O, SMA-OPA-SJ-W, SMA-EFF-SJ-W, SMA-EFF-SJ-O). Auch hier sind weite Bereiche durch eine Molasse-Überdeckung gekennzeichnet. Rezent aktiver Karst dürfte allenfalls im Bereich der Aare als rezenter Vorflut von Festgesteinsaquiferen (Villigen-/Balsthal-Formation) auftreten. Ob in kalkige Partien der Effinger Schichten verkarstet sind oder sich dort Karst entwickeln kann, wäre noch näher zu prüfen.

In der Betrachtungsperiode für SMA-Lager von 100 ka dürfte der zu erwartende, flächige Abtrag von wenigen Dutzend Metern zu keinen prinzipiellen Umgestaltungen der Aquifer-Architektur führen. Wesentliche ortsspezifische Probleme hydrogeologischer Natur sind bei der Erschliessung und dem Bau eines Lagers zum jetzigen Zeitpunkt nicht erkennbar.

### **3.5 SMA Südranden (SH)**

Im Standortgebiet Südranden (früher, d.h. in NTB ,8-03 noch als Gebiet „südliches Schaffhausen“ bezeichnet) könnte ein Tiefenlager unter einem langgestreckten Hügelzug im Tafeljura placiert werden (SMA-OPA-TJ-N). Diese Erhebung besteht im Wesentlichen aus Malm-Kalken (Felsenkalk- und Villigen-Formation).

Basierend auf den Gradienten dürften sich im Hügelszug Karstsysteme entsprechend den Vorflutniveaus in den Schotterkörpern des Rafzer Feldes, im Rheingrundwasser oder eventuell im Klettgau entwickelt haben. Die unter den Kalkserien folgenden Formationen gehören bereits zu den schlecht durchlässigen, oberen Rahmengesteinen des Wirtgesteins Opalinuston (Effinger Schichten der Wildegg-Formation, 'Oberer Dogger' sowie Äquivalente der Klingnau- und der Passwang-Formation).

In der Betrachtungsperiode für SMA-Lager von 100 ka dürfte der zu erwartende, flächige Abtrag von wenigen Dutzend Metern insofern zu Veränderungen führen, als sich die Karstsysteme im Malm weiterentwickeln, ohne diese grundlegend zu verändern. Die Hydrogeologie der Rahmengesteine könnte sich durch den Bau und den Betrieb eines Lagers lokal insofern verändern, als dass die Steigerung der Gradienten infolge der Drainierung durch das Bauwerk lokal die Verkarstung kalkiger Zwischenschichten verstärken wird (vgl. Hinweise im Abschnitt 2). Wesentliche ortsspezifische Probleme hydrogeologischer Natur sind bei der Erschließung und dem Bau eines Lagers zum jetzigen Zeitpunkt trotzdem nicht erkennbar.

### **3.6 SMA Wellenberg (NW, OW)**

Am Wellenberg wird eine tektonische Anhäufung von kretazischen Mergeln mit zerscherten Kalkbankabfolgen der Drusberg-Decke (Palfris- und Vitznau-Mergel) sowie von tertiären Tonmergeln der Axen-Decke (Schimberg-Schiefer und Globigerinen-Mergel) als geeignet für ein Lager erachtet (SMA-MG-HEL). Das bisher erbohrte und getestete Wirtgestein zeigt nur sehr geringe Durchlässigkeiten, was im Einklang mit der Hydrochemie (Austauschwässer vom Typ Na-HCO<sub>3</sub> resp. Formationswässer vom Typ Na-Cl) sowie den Unterdruckzonen (hydrostatische Drücke unter dem Vorflutniveau) steht. "Auslegungsbestimmende Störzonen" respektive "auslegungsbestimmende Fremdgesteinseinschuppungen" müssen bei einer Weiterverfolgung des Projektes mittels Sondierstollen und Bohrungen noch näher erkundet werden.

Südlich des potenziellen Lagers, aber ohne Verbindung zum SMA Wellenberg, existiert in den Kalken der Axen-Decke ein regionales Karstsystem, welches südlich Grafenort in die Vorflut (Engelberger Aa und Lockergesteinsgrundwasserträger in den Aa-Schottern) mündet. Weitere damit verknüpfte Wasserbahnen treten im neuen Bahntunnel Engelberg sowie in den Bergwald-Quellen auf. Nördlich der potenziellen Lagerzone liegen die Kluftwasseraquifere im Diphyoides-Kalk und im Helvetischen Kieselkalk der Drusberg-Decke – soweit bislang bekannt ebenfalls ohne direkte Verbindung mit den Wässern im Lagergebirge. In der Betrachtungsperiode für SMA-Lager von 100 ka dürfte der zu erwartende, flächige Abtrag von ca. 50 bis 300 Metern (vgl. NTB 96-01) zu keinen grundlegenden Veränderungen der hydrogeologischen Systeme führen, d.h. diese werden sehr ähnlich funktionieren wie heute.

## 4. Schlussbemerkungen

Die bevorzugten Wirtgesteine in den vorgeschlagenen Standortgebieten und deren hydrogeologische Begrenzung durch regionale Aquifere wurden analysiert und miteinander verglichen. In den Figuren im Anhang sind die unterschiedlichen Grundwasserstockwerke in den jeweiligen Standortgebieten schematisch zusammengestellt.

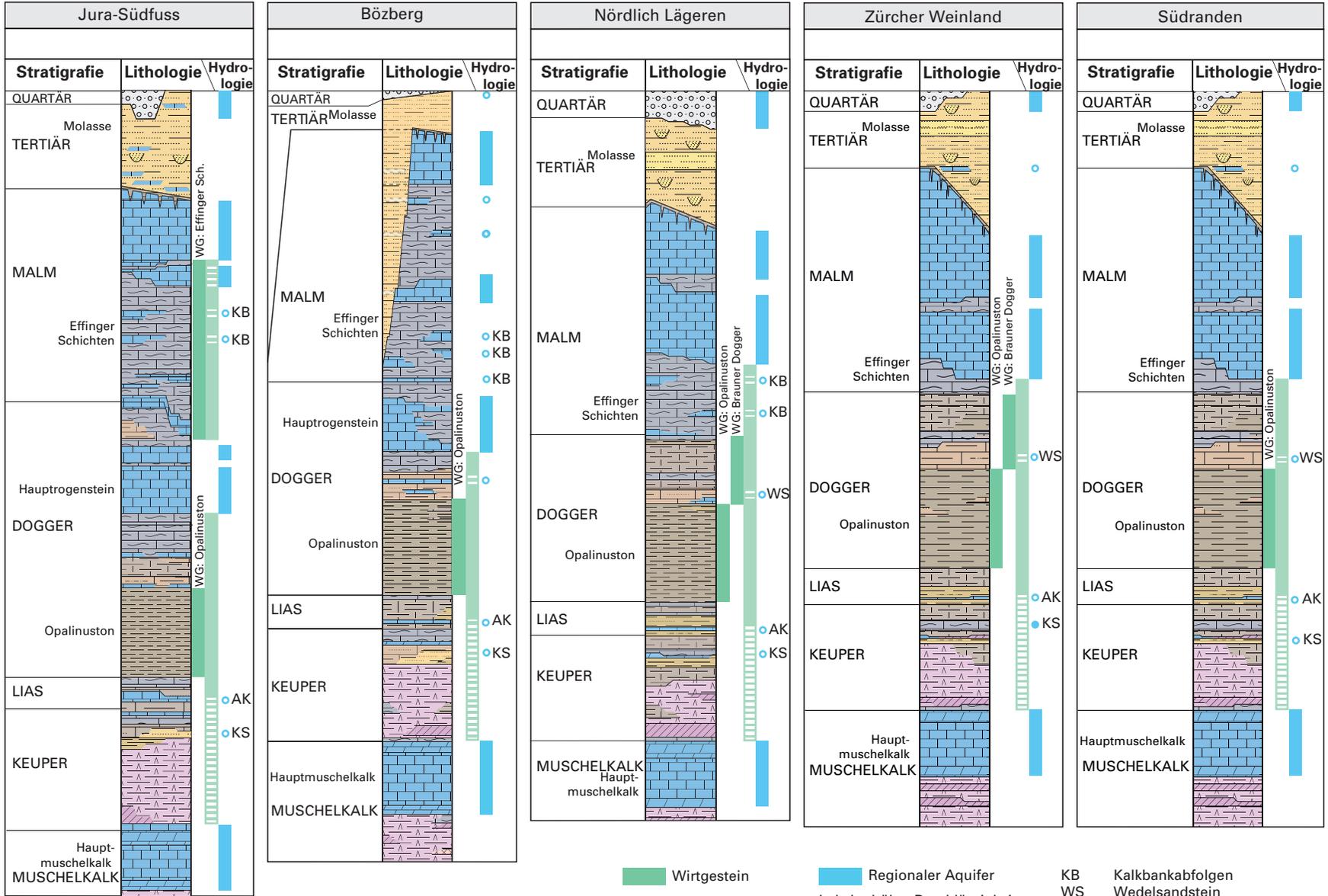
Die wichtigsten Aquifere von regionaler Bedeutung sind in allen alpenfernen geologischen Standortgebieten der Malm-Aquifer oberhalb der vorgeschlagenen Wirtgesteine und der Muschelkalk-Aquifer unterhalb der Wirtgesteine. In den Gebieten Bözberg und Jura-Südfuss ist auch der Hauptrogenstein als weiterer wichtiger regionaler Aquifer zu beachten.

Lokal erhöhte Durchlässigkeiten sind in Kalkabfolgen der Effinger Schichten, in den sandigen Kalken der Wedelsandstein-Formation, im Arietenkalk des unteren Lias und in den Sandsteinen des Keupers potenziell möglich bzw. auch in einigen Fällen nachgewiesen. Diese können, je nach lateraler Ausdehnung und hydraulischer Wirksamkeit, den potenziell einschlusswirksamen Gebirgsbereich einschränken.

Bearbeitet von:  
A. Wildberger

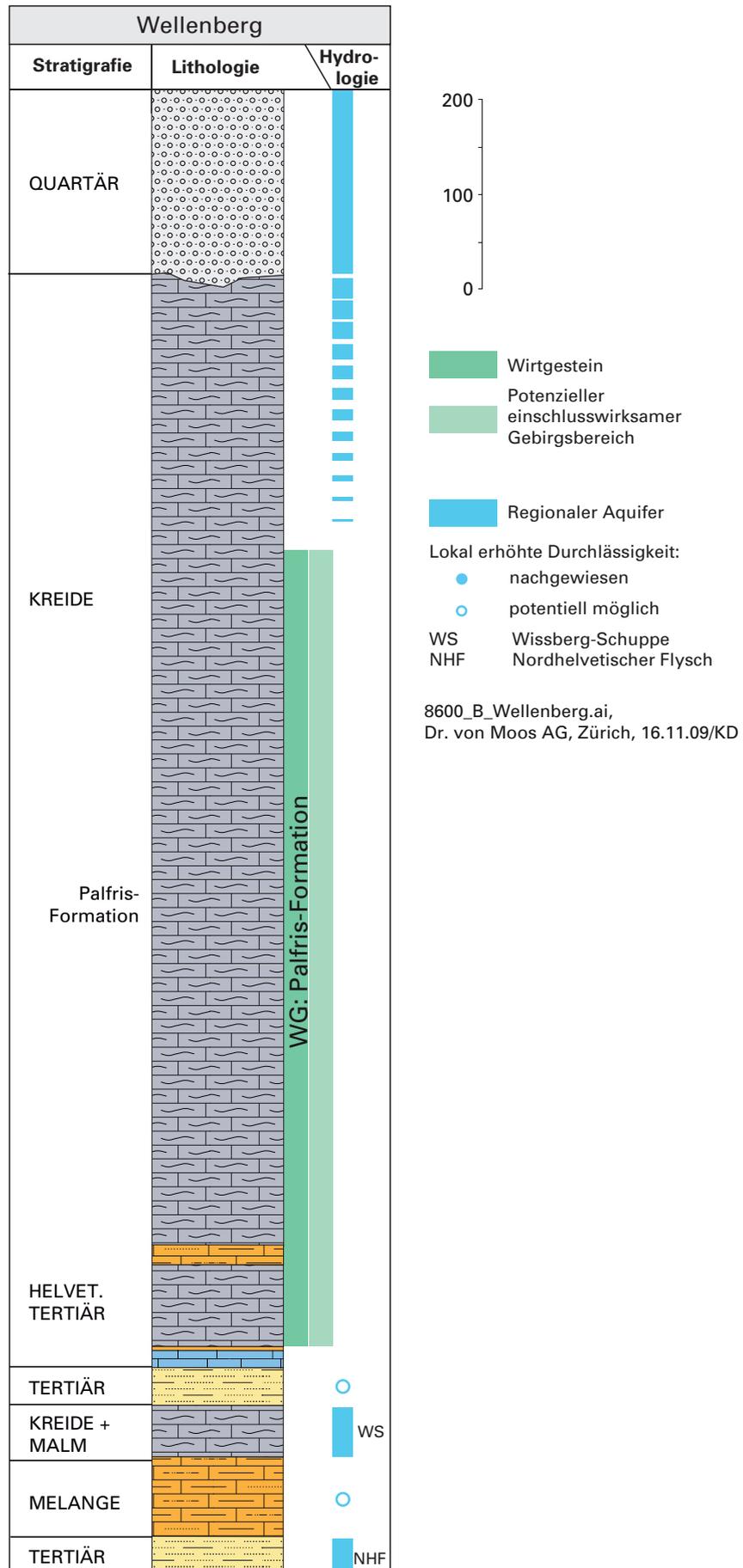
Dr. von Moos AG  
Geotechnisches Büro

8600/Wi/Ri

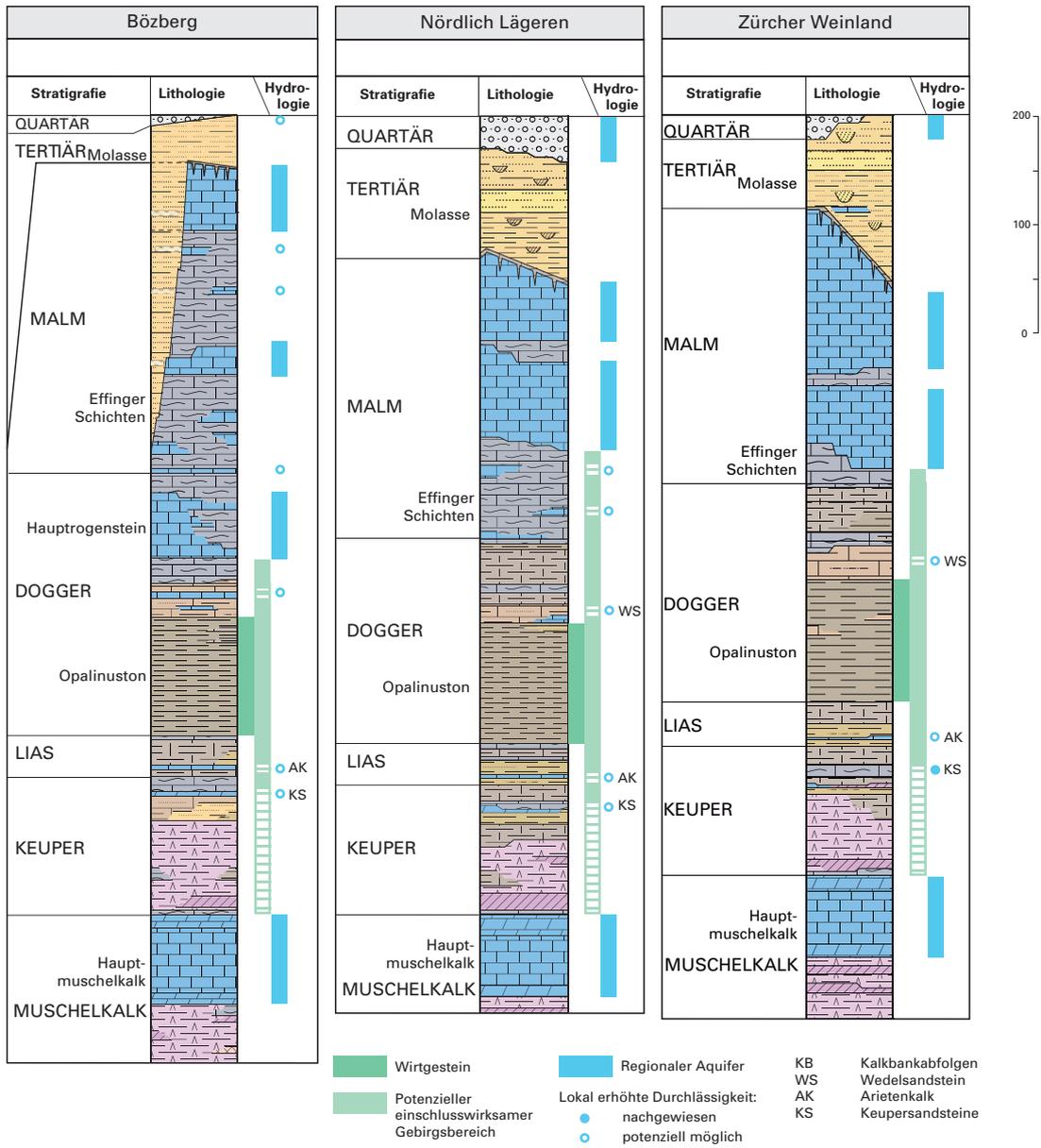


8600\_B\_SMA\_Zusammenstellung.ai, Dr. von Moos AG, Zürich, 16.11.09/KD

- |  |  |                     |
|--|--|---------------------|
| <span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #90EE90; border: 1px solid black;"></span> Wirtgestein                                      | <span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #00BFFF; border: 1px solid black;"></span> Regionaler Aquifer | KB Kalkbankabfolgen |
| <span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #90EE90; border: 1px dashed black;"></span> Potenzieller einschlusswirksamer Gebirgsbereich | Lokal erhöhte Durchlässigkeit:<br>● nachgewiesen<br>○ potenziell möglich   | WS Wedelsandstein   |
|  |  | AK Arietenkalk      |
|  |  | KS Keupersandsteine |



Hydrogeologisches Sammelprofil durch das Standortgebiet Wellenberg



8600\_B\_HAA\_Zusammenstellung.ai, Dr. von Moos AG, Zürich, 16.11.09/KD

### Hydrogeologische Sammelprofile der HAA-Standorte

ENSI 33/069

**Herausgeber:** Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI), CH-5200 Brugg  
Telefon +41(0)56 460 84 00, Telefax +41(0)56 460 84 99

**Zu beziehen bei:** Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI), Informationsdienst, Industriestrasse 19, CH-5200 Brugg  
oder per E-Mail [Infodienst@ensi.ch](mailto:Infodienst@ensi.ch)  
Abrufbar unter [www.ensi.ch](http://www.ensi.ch)