

**Überprüfung durch die Experten der Begleitkommission
der im Felslabor Mont-Terri durchgeführten Experimente
vor dem Hintergrund des Entsorgungsprogramms 2021
(EP21) der Nagra**

Revue par les experts de la Commission de suivi des
expériences réalisées au Laboratoire du Mont-Terri au regard
du programme de gestion des déchets 2021 (EP21) de la
Nagra

07.12.2023

Teil A: Zentrale Fragen der Begleitkommission (Commission de suivi)

Teil B: Epistemologie im Laboratorium Mont-Terri

Zentrale Fragen der Begleitkommission (Commission de suivi, CS)

Die Verweise in eckigen Klammern [...] beziehen sich auf die Kapitel des vollständigen Berichtes «Epistemologie im Laboratorium Mont-Terri» (Teil B).

1. Übertragbarkeit von Resultaten bezüglich verschiedener Fazies/Wirtgesteine / Transférabilité des résultats entre différents faciès et roches hôtes
 - «Alle bisherigen und aktuellen Gasexperimente (HG-A, HG-D, HT, CS, CS-A), ... sind in der tonigen Fazies durchgeführt worden. Zukünftige Nachfolgeexperimente sollten die sandige Fazies berücksichtigen» (Landestopographie 2014) [6.2.7.].
 - «... Zusätzlich empfiehlt das ENSI mögliche Verfüllmörtel für das SMA- und LMA-Lager zum RBG zu überprüfen und zu bewerten, um u. a. sicherzustellen, dass die gewünschte Porosität für den Gastransport erreicht werden kann» (ENSI 33/593, 2018) [6.2.13.].
 - «... Die zementbasierte Verfüllung ... unterstützt wird dies durch internationale Verschluss- und Versiegelungsdemonstrationen sowie durch den Grossversuch im Massstab 1:1 zur Demonstration der gasdurchlässigen Stollenversiegelung im Felslabor Grimsel und die dazugehörigen Laborexperimente» (NTB 21-02) [6.2.22.].
 - Engineered gas transport system (EGTS): «... The design, construction and operation of the full-scale Gas-permeable Seal Test (GAST) at the GTS (*Grimsel Labor*) is seen as a cornerstone in support of Nagra's safety concept for an L/ILW repository» (NTB 21-02) [2.3.4.-2.3.7.].
 - «Die Wirksamkeit der technischen Massnahmen für den Gastransport im geologischen Tiefenlager (z. B. EGTS) und deren Konsequenzen für die Langzeitsicherheit auf der Basis eines integralen standortspezifischen Lagerkonzepts ist aufzuzeigen. Aus Sicht des ENSI muss der Nachweis des von der Nagra vorgeschlagenen EGTS auch mit Ergebnissen aus weiteren Demonstrationsversuchen erbracht werden (ENSI 33/540)» (ENSI 33/593) [6.2.13.].

Die Beschaffenheit des Wirtgesteins ist für die erwähnten geotechnischen Prozesse und Systeme entscheidend. Massgebende frühere Experimente in tonhaltiger Fazies sollten, ergänzend zu DR-D, in sandiger Fazies wiederholt werden. Auch die in granitischem Gestein durchgeführten Versuche sollten im Opalinuston wiederholt werden. Sind die erforderlichen Experimente zur Demonstration der Übertragbarkeit der Ergebnisse zwischen Gesteinstypen im LMT vorgesehen?
2. Pilotlager / Dépôt pilote
 - In Bezug auf die Übertragbarkeit von Erkenntnissen im Allgemeinen stellt das ENSI insbesondere fest (ENSI 33/915, Auflagenantrag A.2, S. 21): "Allerdings erachtet das ENSI die Auswahl von nur zwei Überwachungsparametern Temperatur und Porenwasserdruck für die Überwachung des Pilotlagers im NAB 21-11 als zu gering. Die Argumentation dafür beruht überwiegend darauf, dass es nur für diese beiden Parameter sicherheitstechnisch hergeleitete maximal zuverlässige Werte gibt. Aus Sicht des ENSI wirkt dies zu einschränkend" [1.2.7.].
 - « ... la mise en place de colis n'est pas comprise dans l'analyse TRL (technological readiness level). La Nagra prévoit des tests et le développement technologique nécessaire dans les décennies à venir » (Nagra 21.11.2019) [4.2.3.].
 - Bereits 2019 stellte die AG SiKa/KES zum EP16 fest: «Auch wenn Arbeiten in den Untergrundlabors dazu gemacht wurden oder im Gang sind, fehlt nach wie vor ein Messkonzept zum seit 2005 gesetzlich geforderten Pilotlager. Eine entsprechende Empfehlung zu Inhalt und Umfang von Messungen hat auch die KNS formuliert (KNS 2018, Empfehlung 2, S. 29)».
 - «Es sind Untersuchungen geplant, um in Zukunft das gegenwärtige Verständnis zur Wirksamkeit von Bentonit bei Temperaturen > 100°C weiter zu verbessern» (Nagra 2016, Tab. A.3-3, Page A-27) [3.3.3.]. «Die wissenschaftliche Grundlage erlaubt

uns heute, unter Tiefenlagerbedingungen und Temperaturen bis etwa 150°C anzunehmen, dass der Bentonit seine sicherheitsrelevanten Eigenschaften beibehält. Weitere Anstrengungen sind im Gange, um die Grenzen des Systems bei höheren Temperaturen (> 150°C) auszuloten: HotBent, HiTec etc.» (Nagra 21.11.2019) [3.3.5].

- «For the general license application, the considerations about pilot repository monitoring will remain at a conceptual level. A specific project including a detailed monitoring programme for the pilot repository [sic] is needed not till the application for nuclear construction license» (NTB 21-11). Da die Baubewilligung für die Erdwissenschaftlichen Arbeiten Untertags (EUU) ab 2032 erwartet wird, sollte das «detaillierte Monitoringprogramm» zuvor vorliegen, entsprechend müssten konkrete Pilotlagerpläne in nächster Zeit ausgearbeitet werden.

Ein Experiment, das im LMT ein Pilotlager simuliert, sollte für die nächsten Jahre geplant werden, insbesondere die Bohrtechnologie (Tunnelvortriebsmaschine, Tübbingeinbau etc.), die Technik der Einlagerung der Verpackungen, die Verfüllung, eine zuverlässige robuste Überwachungsinstrumentierung sowie die Bergung der Verpackungen (siehe 4.). Sind solche Experimente in naher Zukunft vorgesehen?

- «Heaters move slightly upwards at the beginning of heating, then slightly downwards since mid-2015. Settlement reaching sensor tolerance». A long-term viability of the monitoring system is important for example for the pilot labor (Nagra 21-02, FE TD 2022) [3.1.12.-3.1.13.].

Wie können die beobachteten Verschiebungen der Verpackungen reduziert werden, um die Schäden an der Instrumentierung zu vermeiden und die Zuverlässigkeit der Messungen zu verbessern?

3. Korrosion / Corrosion

- «..... Recent results from the FE-G experiment at Mont-Terri indicate that the aerobic period in the repository will be much shorter than initially thought» (Giroud et al. 2018, Tomonaga et al. 2019; NTB 21-02, S. 224-225) [3.2.16.].
- «... the impact of organic ¹⁴C on the dose is highly dependent on the corrosion rates, amount of metals and their specific surfaces (Capouet et al. 2018). Nagra will contribute further to the long-term corrosion experiment ... into future safety assessments» (Nagra NTB 21-02, S. 179) [6.1.10.].
- «C¹⁴ is a key radionuclide in the safety assessment of deep geological repositories (DGR) for low- and intermediate-level radioactive waste (L/ILW). Irradiated metallic wastes generated during the decommissioning of nuclear power plants are an important source of ¹⁴C after their disposal in deep geological repositories (DGR). ... In a DGR, the release of ¹⁴C will be mainly in gaseous form and migrate via the gas pathway from the repository near field to the surrounding host rock and eventually to the environment» (Szidat et al., 17.12.2021) [6.1.14.].
- BGR zum GT-Experiment: «In einem Endlager entstehen bei der Korrosion von Metallcontainern, die Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle aufnehmen, Gase, die auf Grund der geringen Permeabilität der abschirmenden Umgebung zu einer signifikanten Druckerhöhung beitragen können. Hierdurch könnten neue Wegsamkeiten für Fluide, zum Beispiel durch das Aufbrechen des Wirtsgesteins, gebildet werden. Für die Erstellung eines geeigneten Sicherheitskonzepts ist ein umfassendes Verständnis der hydrologischen Situation zwingend. Derzeit besteht jedoch noch Forschungsbedarf zur Fluidbewegung. Letztere wird derzeit hauptsächlich durch vier Modelle beschrieben: Diffusion, viskocapillarer Fluss, Bewegung entlang dilatanter Wegsamkeiten oder Migration ermöglicht durch Makrobrüche. Das GT-Experiment dient dem Verständnisgewinn der zugrundeliegenden physikalischen Prozesse der Gasbewegung, wodurch eine realistischere Vorhersage ermöglicht wird. Die Studien zur Fluidmigration werden zuerst im analytischen Labor und danach in situ in Mont Terri durchgeführt und von ausgewählten Modellierungen begleitet» (www.bgr.de).

Die CS ist der Auffassung, dass weitere Versuche bzgl. Korrosion u. a. von Eisen angezeigt sind. Welche Versuche sind im LMT vorgesehen, um diese Fragen zu beantworten?

4. Rückholbarkeit / Récupérabilité

- Rückholbarkeit ist erst möglich, wenn Einlagerung und Verfüllung technisch und betrieblich einwandfrei stattfinden können. Erste Schritte dazu sind im FE-Experiment getan worden (ebenso im HotBent-Experiment im Felslabor Grimsel, NAB 20-18). Zusätzlich muss die Fernbedienung in den dannzumal aufgeheizten Lagerstollen ausgetestet werden. Auch wenn ausreichend Zeit für Weiterentwicklungen bis zur allfälligen Rückholung von Abfällen bleibt, ist die Projektantin gut beraten, die dafür nötige Technik bereits heute auszuarbeiten.
- «All questions regarding a realistic retrieval of radioactive waste: these should be demonstrated now, and not in 20 years at a site-specific laboratory. Such a realistic retrieval concept will certainly have an impact on the repository concept» (Bossart 2021) [1.2.8].

Die CS ist der Auffassung, dass weitere Versuche im Hinblick auf Rückholbarkeit angezeigt sind, u. a. im Zusammenhang mit der Festlegung der Endlagerbehälter und Versiegelungsstrecken, Verschlussbauwerken, Zwischensiegeln, Ausbruchsicherung und Ausbau, Verfüllung sowie Behältermaterialien.

5. Die Ergebnisse weiterer Untersuchungen werden mit grossem Interesse erwartet / Les résultats d'autres investigations sont attendus avec grand intérêt

- Einflüsse der Durchbohrung der Galerie 18 (Nagra 21.11.2019)
- FE-Modelling (Nagra 21.11.2019)
- Modellierung und Analyse der Ungewissheiten (Nagra 21.11.2019)
- Self-Sealing (NTB 21-02, S. 166)
- Tunnel support type (Ingenieurgeologie ETHZ 2015; NTB 21-02, S. 190, 192)
- FE-G (TN 2018-85); Gas-Dynamik (NTB 15-02, 2019, S. 115; Nagra 21.11.2019)

Teil B: Epistemologie im Laboratorium Mont-Terri, 31.05.2023

Épistémologie au Laboratoire du Mont-Terri
Analyse critique de la recherche appliquée au LMT

Epistemologie im Laboratorium Mont-Terri
Kritische Analyse der im LMT angewandten Forschung

31.05.2023

Table des matières / Inhaltverzeichnis

Préambule.....	2
Vorwort.....	4
1. Allgemeines.....	6
1.1. Frühere offizielle Auflagen.....	6
1.2. Forschung.....	7
1.3. Qualitätssicherung der Forschung.....	9
2. Geologie.....	10
2.1. Opalinuston.....	10
2.2. Sandy facies versus shaly facies.....	10
2.3. THM.....	12
2.4. Selbstabdichtung.....	14
2.5. Geomechanik.....	15
3. Lagerkonzepte und Materialien.....	17
3.1. Grundlagen.....	17
3.2. Verpackung.....	18
3.3. Bentonit.....	21
4. Bautechnik.....	24
4.1. Konzept.....	24
4.2. Versiegelung.....	25
4.3. Support.....	26
5. Mikrobiologie.....	26
5.1. Mikrobiologische Aktivität.....	26
5.2. Mikrobiologische Gasentwicklung.....	27
6. Mobilität.....	28
6.1. Radionuklide.....	28
6.2. Gase.....	31
6.3. Wasser.....	35
7. Glossar.....	37
8. Quellen.....	38

Préambule

Processus

Les résultats des travaux de recherche et de démonstration exécutés dans le laboratoire du Mont-Terri (LMT)¹ sont essentiels pour étayer et développer les connaissances scientifiques, en particulier celles traitant des modèles de stockage définitif dans le cadre du plan sectoriel « Dépôts en couches géologiques profondes »². Les résultats obtenus au LMT sont cités un grand nombre de fois dans les documents des étapes 1 à 3 et contribuent à la solidité et à l'acceptation des procédures et solutions proposées. Les expériences en cours font l'objet de notes techniques internes au LMT (extranet) auxquelles les membres associés et la Commission de Suivi ont accès. À la fin d'une expérience ou lors d'un jalon important, les résultats des recherches sont publiés sur des sites web des partenaires ou dans des revues scientifiques spécialisées. La Nagra³ a recours à des experts externes chargés d'apporter des conseils spécialisés d'ordre supérieur pendant l'exécution des projets ainsi que de vérifier les résultats des travaux (Géoscience, Ingénierie, Barrière, Sécurité⁴). À chaque étape du plan sectoriel, la Nagra élabore des documents de synthèse sur l'avancement des travaux de recherche visant à réaliser un stockage en profondeur selon le concept envisagé. Ces documents sont analysés par l'IFSN⁵ (avec le soutien de l'EGT⁶), l'OFEN⁷ (avec le soutien de l'AGNEB⁸ et du Comité consultatif « Gestion des déchets »⁹), la CSN¹⁰ et par le Comité des Cantons (AdK)¹¹. Sur ces bases, le Conseil Fédéral a édicté un arrêté avec un rapport succinct des résultats, approuvant la fin de l'étape du plan sectoriel¹². Il faut constater qu'il n'y a pas de processus formel d'évaluation de la recherche dans le cadre du plan sectoriel, même si la Nagra doit périodiquement (chaque 5 années) présenter un programme de gestion des déchets, accompagné d'un plan de recherche. Lors de l'édition de 2016 le DETEC a décidé de ne pas procéder à une consultation officielle¹³. Le 12.09.2022 la Nagra a annoncé son intention de construire le dépôt en couches géologiques profondes prévu pour les déchets radioactifs sur le site « Nord des Lägern », et l'installation de conditionnement des éléments combustibles sur le site de l'actuel dépôt intermédiaire centralisé, à Würenlingen¹⁴.

Épistémologie au LMT

Les recherches effectuées au LMT en liaison avec l'enfouissement de déchets radioactifs sont des projets proposés en grande partie par les partenaires responsables de ou mandatés pour la réalisation d'un dépôt nucléaire (exploitants de centrales, Nagra) donc fortement intéressés à une réalisation finale selon leurs propres concepts et en fonction de contraintes financières et de calendrier spécifiques. La question de la pertinence, de l'objectivité et de l'exhaustivité (adéquation) des projets de recherche du LMT doit être

¹ LMT, Laboratoire du Mont-Terri; <https://www.jura.ch/DEN/SIN/Laboratoire-du-Mont-Terri/Laboratoire-du-Mont-Terri-un-projet-international.html>

² <https://www.are.admin.ch/are/fr/home/developpement-et-amenagement-du-territoire/strategie-et-planification/conceptions-et-plans-sectoriels/plans-sectoriels-de-la-confederation/plan-sectoriel-des-depots-en-couches-geologiques-profondes-sgt.html>

³ Nagra, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, 5430 Wettingen; <https://nagra.ch/fr>

⁴ Organes de consultation de la Nagra : <https://nagra.ch/fr/forum-scientifique/organes-de-consultation/>

⁵ IFSN (ENSI), Inspection fédérale de la sécurité nucléaire ; <https://www.ensi.ch/fr/>

⁶ EGT, Expertengruppe Geologische Tiefenlagerung ; <http://www.egt-schweiz.ch>

⁷ OFEN (BFE), Office fédéral de l'Énergie ; <https://www.bfe.admin.ch/bfe/fr/home.html>

⁸ AGNEB, représentants des offices et services fédéraux concernés, rapporte au Conseil Fédéral ; <https://www.bfe.admin.ch/bfe/fr/home/approvisionnement/energie-nucleaire/dechets-radioactifs/bases-de-la-gestion-des-dechets/agneb.html>

⁹ Comité consultatif du DETEC (Beirat Entsorgung) ; <https://www.bfe.admin.ch/bfe/fr/home/approvisionnement/energie-nucleaire/dechets-radioactifs/plan-sectoriel-depots-en-couches-geologiques-profondes/comite-consultatif-gestion-des-dechets.html>

¹⁰ CSN (KNS), Commission fédérale de la sécurité nucléaire ; <https://www.bfe.admin.ch/bfe/fr/home/approvisionnement/surveillance-et-securite/commissions-et-organes-dinspection/commission-federale-de-securite-nucleaire-csn.html>

¹¹ AdK, Comité des Cantons ; https://awel.zh.ch/internet/baudirektion/awel/de/energie_radioaktive_abfaelle_radioaktive_abfaelliefenlager/ausschuss_der_kantone_sicherheit.html

¹² Bundesrat Verfügung 21.11.2018; <https://www.admin.ch/gov/de/start/dokumentation/medienmitteilungen.msg-id-73055.html>

¹³ Communiqué de presse du 24 mai 2018 : « ... il ne s'agit pas là d'un projet fédéral mais d'un programme technique des responsables de la gestion des déchets, programme que les autorités fédérales vérifient et surveillent » (AG SiKa/KES, 2019).

¹⁴ <https://www.are.admin.ch/are/fr/home/media-et-publications/communiques-de-presse/medienmitteilungen-im-dienst.msg-id-90310.html>

posée. Le risque de tomber dans des biais de confirmation est réel¹⁵. L'IFSN, l'OFEN et la CSN ne disposent pas de toutes les compétences scientifiques nécessaires pour couvrir tous les différents domaines de recherche dans le cadre du plan sectoriel.

Or il est impératif d'éviter que les expériences réalisées au LMT ne puissent être taxées d'alibi tendant à cautionner la pérennité des dépôts en profondeur : c'est la crédibilité de la recherche effectuée au LMT qui est en jeu et celle du Canton du Jura qui met son sous-sol à disposition. La proposition de mettre en place un groupe d'accompagnement scientifique d'experts indépendants avec pour mission de procéder régulièrement et en toute indépendance d'esprit à une réflexion sur la pertinence des expériences et des projets de recherche réalisés dans le LMT en regard des progrès techniques et de l'évolution des connaissances scientifiques n'a pas trouvé le soutien politique nécessaire. Des expériences complémentaires peuvent au besoin être proposées par le biais de l'AdK ou autres organes.

Questions d'éthique et d'honnêteté scientifique

- Les expériences sélectionnées sont-elles à même d'apporter les réponses aux problèmes clés (p.e. validation de la démonstration de sûreté à long terme, réversibilité/récupérabilité, gestion des erreurs) en relation avec un dépôt en profondeur ?
- Les expériences sélectionnées sont-elles pertinentes ?
- Qui vérifie que les projets couvrent les domaines problématiques sans conflit d'intérêt ?
- Quelle est la responsabilité de l'État quant à la probité de la recherche scientifique dans le cadre du plan sectoriel et quel sera son rôle dans le futur ?
- Un dépôt (national) en profondeur est-il la seule bonne solution (TFS¹⁶)?

Remarques

La liste ci-dessous de certains thèmes de recherche appliqués au LMT est avant tout un document de travail pour montrer l'utilité d'un accompagnement externe contribuant à l'épistémologie de la recherche scientifique au laboratoire. Seules les questions en relation avec la recherche appliquée au LMT sont abordées dans ce document. Tous les autres aspects liés au plan sectoriel (examen du site choisi, constructions externes, laboratoire pilote sur site, risques d'irradiation etc.) ne sont pas traités.

Cette analyse tient compte des documents disponibles jusqu'à fin mai 2023 et cite des extraits de rapports officiels dans leur langue originale (français, allemand, anglais).

Les promesses, propositions, attentes, demandes, exigences citées ci-dessous émanent des autorités fédérales et cantonales ainsi que d'autres entités engagées dans le processus du plan sectoriel (OFEN, IFSN y compris TFS+TFE, CSN, EGT, Nagra, Swisstopo, AdK, AG SIKa, SES etc.).

Il s'agit en particulier de vérifier si dans le programme RD&D 2021¹⁷ les exigences et promesses relevées ci-dessous en relation avec la recherche au LMT ont été respectées :

Bleu : thèmes majeurs encore ouverts

Vert : assertions et promesses de la Nagra

Rouge : aspects critiques

Violet : questions de la Commission de suivi sur l'expérience FE ; ⇒ Réponses Nagra

¹⁵ Confirmation bias: «The tendency to expose oneself only to those opinions and beliefs that confirm what one already thinks and to accept only the evidence that supports this»; Al Khalili, «Joy of Science», Princeton University, 5. April 2022.

Biais de confirmation, Wikipedia : https://fr.wikipedia.org/wiki/Biais_de_confirmation

¹⁶ TFS Technisches Forum Sicherheit: <https://www.ensi.ch/de/technisches-forum/?question-forum=bfe-technisches-forum-sicherheit>. Question 135 ; réponse BFE et Nagra 2017

¹⁷ Technical Report 21-02: The Nagra Research, Development and Demonstration (RD&D) Plan for the Disposal of Radioactive Waste in Switzerland November 2021 <https://nagra.ch/wp-content/uploads/2022/08/NTB-21-02.pdf>

Vorwort

Vorgehen

Die Ergebnisse der im Labor Mont-Terri (LMT)¹⁸ durchgeführten Forschungs- und Demonstrationsarbeiten sind von wesentlicher Bedeutung für die Unterstützung und Weiterentwicklung der wissenschaftlichen Erkenntnisse, die sich mit den Endlagermodellen des «Sachplans für geologische Tiefenlager»¹⁹ befassen. Die im LMT erzielten Ergebnisse wurden in den Dokumenten der Etappen 1 bis 3 vielfach zitiert und tragen zur Solidität und Akzeptanz der vorgeschlagenen Verfahren und Lösungen bei. Die laufenden Versuche sind Gegenstand interner technischer Notizen der LMT (Extranet), zu denen die assoziierten Mitglieder und der Begleitausschuss (Commission de suivi) Zugang haben. Am Ende eines Experiments oder bei einem wichtigen Meilenstein werden die Forschungsergebnisse auf den Websites der Partner oder in wissenschaftlichen Fachzeitschriften veröffentlicht. Die Nagra²⁰ stützt sich auf Beratergremien, um übergeordnete und fachlich detaillierte Fragen nachzugehen (Geowissenschaft, Ingenieurwissenschaft, Barrierewirksamkeit, Sicherheitsnachweise²¹). Am Ende jeder Etappe des Sachplans erstellt die Nagra zusammenfassende Dokumente über die Experimente im Zusammenhang mit dem Tiefenlager nach dem vorgesehenen Konzept. Diese Dokumente werden vom ENSI²² (mit Unterstützung der EGT²³), vom BFE²⁴ (mit Unterstützung der AGNEB²⁵ und der Beratenden Kommission für Abfallwirtschaft²⁶), von der KNS²⁷ und von der AdK²⁸ ausgewertet. Auf diesen Grundlagen hat der Bundesrat eine Verordnung mit einem zusammenfassenden Bericht über die Ergebnisse erlassen, mit dem er den Abschluss der Etappe 2 des Sachplans genehmigte. Es sei darauf hingewiesen, dass es im Rahmen des Sachplans kein formelles Verfahren zur Bewertung der Forschung gibt, auch wenn die Nagra regelmässig (alle 5 Jahre, Art. 52 KEV) ein Entsorgungsprogramm zusammen mit einem Forschungsplan vorlegen muss. Bei der Ausgabe 2016 hat das UVEK beschlossen, keine formelle Anhörung durchzuführen²⁹. Am 12.09.2022 hat die Nagra angekündigt, dass sie das geplante geologische Tiefenlager für radioaktive Abfälle im Standortgebiet Nördlich Lägern und die Brennelementverpackungsanlage am Standort des bestehenden zentralen Zwischenlagers in Würenlingen erstellen will³⁰.

Wissenschaftslehre im LMT

Bei den im LMT durchgeführten Forschungsarbeiten handelt es sich grösstenteils um Projekte, die von den für ein nukleares Endlager verantwortlichen (Entsorgungspflichtige wie Kraftwerksbetreiber) bzw. beauftragten (wie die Nagra) Partnern vorgeschlagen werden, die daher ein starkes Interesse an einer endgültigen Realisierung nach ihren eigenen Konzepten und nach bestimmten finanziellen und zeitlichen Vorgaben haben. Die Frage nach der Relevanz, Objektivität und Vollständigkeit (Angemessenheit) der Forschungsprojekte im LMT

¹⁸ LMT, Laboratoire du Mont-Terri; <https://www.jura.ch/DEN/SIN/Laboratoire-du-Mont-Terri/Laboratoire-du-Mont-Terri-un-projet-international.html>

¹⁹ Sachplan Geologische Tiefenlager, SGT; <https://www.are.admin.ch/are/de/home/raumentwicklung-und-raumplanung/strategie-und-planung/konzepte-und-sachplaene/sachplaene-des-bundes/sachplan-geologische-tiefenlager-sgt.html>

²⁰ Nagra, Nationale Genossenschaft für die Lagerung Radioaktiver Abfälle; <https://www.Nagra.ch/de>

²¹ Beratergremien der Nagra; <https://www.nagra.ch/de/beratergremien>

²² ENSI, Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat; <https://www.ensi.ch/de/>

²³ EGT, Expertengruppe Geologische Tiefenlagerung; <http://www.egt-schweiz.ch>

²⁴ BFE, Bundesamt für Energie; <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home.html>

²⁵ AGNEB, Arbeitsgruppe des Bundes für die nukleare Entsorgung; <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/versorgung/kernenergie/radioaktive-abfaelle/grundlagen-entsorgung/agneb.html>

²⁶ Beirat Entsorgung des UVEK; <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/versorgung/kernenergie/radioaktive-abfaelle/sachplan-geologische-tiefenlager/beirat-entsorgung.html>

²⁷ KNS, Eidgenössische Kommission für Nukleare Sicherheit; <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/versorgung/aufsicht-und-sicherheit/kommissionen-und-inspektorate/eidgenoessische-kommission-fuer-nukleare-sicherheit-kns.html/>

²⁸ AdK, Ausschuss der Kantone; <https://www.zh.ch/de/umwelt-tiere/abfall-rohstoffe/radioaktive-abfaelle-tiefenlager/ausschuss-der-kantone-sicherheit.html>

²⁹ Medienmitteilung vom 24. Mai 2018: « ... [das Entsorgungsprogramm ist] kein Bundesvorhaben, sondern ein technisches Programm der Entsorgungspflichtigen, das von den Bundesbehörden überprüft und überwacht wird». <https://www.uvek.admin.ch/uvek/de/home/uvek/medien/medienmitteilungen.msg-id-70855.html>

³⁰ <https://www.are.admin.ch/are/de/home/medien-und-publikationen/medienmitteilungen/medienmitteilungen-im-dienst.msg-id-90310.html>

muss gestellt werden. Es besteht die Gefahr, in Bestätigungsbias zu verfallen³¹. Das ENSI, das BFE und die KNS verfügen nicht über das erforderliche wissenschaftliche Fachwissen, um die verschiedenen Forschungsbereiche im Rahmen des Sachplans abzudecken.

Es muss unbedingt verhindert werden, dass die im LMT durchgeführten Experimente als Alibi für die Realisierung eines geologischen Tiefenlagers abgewertet werden: Die Glaubwürdigkeit, der im LMT durchgeführten Forschung steht auf dem Spiel, ebenso wie die des Kantons Jura, der seinen Untergrund zur Verfügung stellt. Der Vorschlag eine wissenschaftliche Beratergruppe unabhängiger Experten zu bilden, die regelmässig und unabhängig die Relevanz, der im LMT durchgeführten Experimente und Forschungsprojekte im Lichte des technischen Fortschritts und der Entwicklung der wissenschaftlichen Erkenntnisse überprüfen soll, hat nicht die notwendige politische Unterstützung gefunden. Bei Bedarf können dennoch weitere Experimente durch die AdK oder andere Gremien vorgeschlagen werden.

Fragen der Ethik und der wissenschaftlichen Ehrlichkeit

- Gehen die ausgewählten Experimente auf alle wichtigen Probleme der Tiefenlagerung nach (z. B. Validierung des langfristigen Sicherheitsnachweises, Rückholbarkeit, Fehlermanagement)?
- Sind die ausgewählten Experimente relevant?
- Wer überprüft, ob die Projekte alle Problembereiche abdecken, ohne Interessenkonflikt?
- Welche Verantwortung trägt der Staat für die Aufrichtigkeit der wissenschaftlichen Forschung im Rahmen des Sachplans und welche Rolle wird er in Zukunft spielen?
- Ist ein (nationales) Tiefenlager die einzig richtige Lösung (TFS³²)?

Bemerkungen

Die folgende Liste von gewissen Forschungsthemen, die im LMT nachgegangen werden, ist in erster Linie ein Arbeitsdokument, um die Nützlichkeit externer Unterstützung aufzuzeigen, die zur Epistemologie der wissenschaftlichen Forschung im LMT beiträgt. In diesem Dokument werden nur Fragen behandelt, die sich auf die angewandte Forschung im LMT beziehen. Alle anderen Aspekte im Zusammenhang mit dem Sachplan (Ermittlung potenzieller Standorte, Merkmale der geplanten Standorte, Aussenanlagen, Pilotlabor vor Ort, Strahlungsrisiken usw.) werden nicht behandelt.

Diese Analyse berücksichtigt Dokumente, die bis Mai 2023 verfügbar waren. Auszüge aus den offiziellen Berichten werden in der Originalsprache (Französisch, Deutsch, Englisch) aufgeführt. Die zitierten Versprechungen, Vorschläge, Erwartungen, Forderungen und Auflagen stammen von den Behörden des Bundes und der Kantone sowie von anderen am Sachplanverfahren beteiligten Stellen (BFE, ENSI inkl. TFS+TFE, KNS, EGT, Nagra, Swisstopo, AdK, AG SIKA, SES usw.).

Das Entsorgungsprogramm RD&D 2021³³ der Nagra soll darauf geprüft werden, ob die unten aufgeführten Anforderungen und Versprechen in Verbindung mit der Forschung im LMT eingehalten wurden:

Blau: offene gewichtige Fragen

Grün: Behauptungen und Versprechen

Rot: kritische Aspekte

Lila: Fragen der Commission de suivi zum FE-Experiment ; ⇒ Antworten der Nagra

³¹ Confirmation bias: «The tendency to expose oneself only to those opinions and beliefs that confirm what one already thinks and to accept only the evidence that supports this»; Al Khalili, «Joy of Science», Princeton University, 5. April 2022.

Biais de confirmation, Wikipedia : https://fr.wikipedia.org/wiki/Biais_de_confirmation

³² TFS Technisches Forum Sicherheit: <https://www.ensi.ch/de/technisches-forum/?question-forum=bfe-technisches-forum-sicherheit>. Frage 135 und Antwort BFE, NAGRA 2017

³³ Technical Report 21-02: The Nagra Research, Development and Demonstration (RD&D) Plan for the Disposal of Radioactive Waste in Switzerland November 2021 <https://nagra.ch/wp-content/uploads/2022/08/NTB-21-02.pdf>

1. 1. Allgemeines

1.1. Frühere offizielle Auflagen

1.1.1. «Auflage 6.1 des Bundesrates 2013 (teilerfüllt): Darin sind Zweck, Umfang, Art und zeitliche Abfolge der zukünftigen RD&D-Aktivitäten sowie der Umgang mit bestehenden offenen Fragen zu dokumentieren.

Der Teil der bundesstaatlichen Auflage 6.1, welcher die Dokumentation des Umgangs mit bestehenden offenen Fragen verlangt, wurde nicht erfüllt. Zu diesem Teil der Auflage wurde ein entsprechender Auflagenantrag (A.6) formuliert» (ENSI 33/592, Seite 45, 2018).

1.1.2. «In künftige Entsorgungsprogramme und RD&D-Pläne ist eine vollständige Auflistung der aus Sicht der Entsorgungspflichtigen wichtigen offenen Fragen aufzunehmen.

Spezifische offene Fragen sind nicht aufgelistet. Für zukünftige Entsorgungsprogramme und RD&D-Pläne fordert das ENSI eine Auflistung der aus Sicht der Nagra wichtigen offenen Fragen ... Der Teil der Auflage 6.1, welcher die Dokumentation des Umgangs mit bestehenden offenen Fragen verlangt, wurde nicht erfüllt. Zu diesem Teil der Auflage wurde ein entsprechender Auflagenantrag A.6 gestellt:

A.6: In künftige Entsorgungsprogramme und RD&D-Pläne ist eine **vollständige Auflistung** der **aus Sicht der Entsorgungspflichtigen** wichtigen offenen Fragen aufzunehmen, zusammen mit Angaben darüber, wie und innert welcher Frist die Entsorgungspflichtigen deren Beantwortung vorsehen (ENSI 33/592, Seiten 34 und 48, 2018).

Deshalb unterstützt die AG SiKa/KES die Forderung des ENSI nach einer «vernetzten Darstellung einzelner Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten miteinander und mit den Meilensteinen und Entscheidungen bei der Realisierung eines geologischen Tiefenlagers» (AG SIKa/KES 2019, S.7).

1.1.3. «Auflage 4.1 des Bundesrates 2018: ... In künftige Forschungs-, Entwicklungs- und Demonstrationspläne ist eine **vollständige Auflistung** der **aus Sicht der Nagra** wichtigen offenen Fragen aufzunehmen, zusammen mit Angaben darüber, wie und innert welcher Frist die Nagra deren Beantwortung vorsieht» (Bundesrat Verfügung 2018).

1.1.4. «Das Fazit wird bestätigt durch die Stellungnahmen von ENSI und KNS, die eine Weiterführung der einschlägigen bundesrätlichen Auflagen empfehlen. Diese Empfehlungen sind inzwischen vom Bundesrat als Auflagen für weitere Entsorgungsprogramme aufgenommen worden» (Bundesrat 2018; AG SIKa/KES 2019, S. 11).

1.1.5. «Im RD&D Plan (EP16) werden von der Nagra die in den kommenden 5 bis 10 Jahren geplanten Arbeiten dargestellt. Zur Beurteilung der Relevanz der von der Nagra geplanten Arbeiten, insbesondere im Hinblick auf die Rahmenbewilligungsgesuche, sollten aus Sicht der KNS **die massgebenden Fragestellungen mit dem dazugehörigen Zeithorizont aufgelistet** und dann aufgezeigt werden, wie erforderliche Lösungen zeitgerecht erreicht werden können. Von Bedeutung ist auch, **mögliche Konsequenzen aufzuzeigen, falls die angestrebten Ziele nicht oder nicht vollumfänglich erreicht** werden können. Die KNS empfiehlt der Nagra, bei der nächsten Aktualisierung des RD&D-Plans diese Punkte zu berücksichtigen (Empfehlung 4 KNS 2018, S. 30).

Die AG SiKa/KES vermisst eine Auflistung und Bearbeitung der **offenen Fragen** sowie der Forschungsprojekte, welche zu deren Beantwortung durchgeführt werden. Zudem fehlen Angaben, bis **zu welchem Zeitpunkt** entsprechende Forschungsergebnisse erwartet werden und wie diese bei der Projektierung des Tiefenlagers berücksichtigt werden» (AG SIKa/KES 2019, S. 7).

⇒ Nagra NTB 21-02, A1-2 (S. 342) (EP21): «Nagra is of the opinion that open questions are best captured by defining programme aspects that have a significant RD&D component and developing a dedicated roadmap for each of these with a planning horizon up to 2060 when the repositories go into operation».

1.1.6. «In künftigen Entsorgungsprogrammen sind in den RD&D-Plänen zu jedem Forschungsgebiet die Fortschritte der Forschungsprojekte gegen- über dem Stand im vorherigen RD&D-Plan aufzuzeigen. Dies betrifft insbesondere auch die Fälle, in denen ein Experiment nicht erfolgreich war oder abgebrochen wurde» [ENSI 33/915, S. 57+67].

1.1.7. «Der Hinweis des ENSI, dass die Nagra im nächsten Entsorgungsprogramm vertiefter erläutern soll, mit welchen Massnahmen sie plant, Verzögerungen zu vermeiden bzw. möglichst klein zu halten, wird von der KNS grundsätzlich unterstützt. ... die zeitnahe Evaluation möglicher Alternativen oder Konsequenzen für den Fall, dass angestrebte Ziele nicht erreicht werden oder sich gewählte Lösungsansätze als nicht zweckmässig

herausstellen. Diesen Aspekt sieht die KNS im aktuellen RD&D-Plan noch nicht vollumfänglich umgesetzt und bewertet die bundesrätliche Auflage 4.1 zum EP16 diesbezüglich nur als teilerfüllt» (KNS 2023, S. 29).

1.2. Forschung

1.2.1. Ist genügend Zeit vorhanden, um offene Fragen mittels Forschung vertieft klären zu können? Wo erforderlich, hat das ENSI spezifische Auflagenanträge bzw. Empfehlungen formuliert (ENSI 33/592, Seite 6, 2018; ENSI 33/593, 2018).

1.2.2. «Das ENSI weist darauf hin, dass **Langzeitversuche zum Verhalten von SMA-Abfällen frühzeitig im Rahmen von Felslabor-Experimenten (z. B. Mont-Terri)** durchgeführt werden sollten» (ENSI 33/592, Seite 33, 2018).

1.2.3. «In künftigen RD&D-Pläne sind zu jedem Forschungsgebiet die Ergebnisse der Forschungsprojekte und Experimente aufzuzeigen, die in der vorherigen Version des RD&D-Plans zu diesem Forschungsgebiet aufgeführt wurden. Dies auch, falls ein Experiment nicht erfolgreich war oder abgebrochen wurde:

A.11: In künftigen RD&D-Pläne sind zu jedem Forschungsgebiet die Ergebnisse der Forschungsprojekte und Experimente aufzuzeigen, die in der vorherigen Version des RD&D-Plans zu diesem Forschungsgebiet aufgeführt wurden. **Dies auch, falls ein Experiment nicht erfolgreich war oder abgebrochen wurde** (ENSI 33/592, Seiten 41 und 49, 2018).

Auflage 6.1 des Bundesrates 2018: Die Nagra hat Forschungsaktivitäten hinsichtlich Brennelement-Alterung und Trockenlagerung in zukünftigen Forschungs-, Entwicklungs- und Demonstrationsplänen zu berücksichtigen. Die Ergebnisse der Forschungsprojekte und Experimente, die in der vorherigen Version des Forschungs-, Entwicklungs- und Demonstrationsplan aufgeführt wurden, sind aufzuzeigen» (Bundesrat Verfügung 2018).

1.2.4. «Für die Umsetzung des Realisierungsplans aus heutiger Sicht zu bearbeitenden Themen (Tab. A.3-1, Nagra NTB 16-01, Seite A-19):

- Geologische Untersuchungen
 - Vertiefung des Prozessverständnisses (Transportmechanismen, Gasfreisetzung, Selbstabdichtung, gekoppelte Phänomene, Felsmechanik etc.)
 - ...
- Sicherheit und Abklärung sicherheitsrelevanter Phänomene
 - Charakterisierung der Immobilisierungs-, Retardierungs- und Transportphänomene für Radionuklide (insbesondere bzgl. Geochemie) in den technischen und geologischen Barrieren nach Verschluss der Tiefenlager und deren Berücksichtigung in den Modellen der Sicherheitsanalyse.
 - ...»

1.2.5. «Themen, die gemäss Realisierungsplan aus heutiger Sicht im Rahmen der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten (RD&D-Programm) in den nächsten 10 Jahren behandelt werden. Dabei geht es:

- um **Modelle** (litho-stratigraphische Schichtmodelle, Störungsmodelle),
- um die Beschreibung der relevanten Eigenschaften und ihrer **Variabilität** (z.B. Mineralogie, Porosität, hydraulische Leitfähigkeit, geomechanische Eigenschaften, Gastransporteigenschaften)
- sowie um **dynamische Modelle** zur Definition und Vorhersage der In-Situ-Zustandsbedingungen (Porendruck, Wassersättigung, chemische Zusammensetzung der Wässer, Temperatur, Spannungszustand, Beanspruchung/Verformung)» (Nagra 2016, Tab. A.3-3, Seite A-24).

1.2.6. «Das ENSI weist darauf hin, dass **RD&D-Aktivitäten, welche bis zum Einreichen des Rahmenbewilligungsgesuchs abgeschlossen sein müssen, bereits in den kommenden 5 bis etwa 8 Jahren beendet werden müssen, um zu gewährleisten, dass die Ergebnisse noch auf Stufe Rahmenbewilligungsgesuch berücksichtigt werden können.** Das ENSI hat diesbezügliche Empfehlungen in seiner Aktennotiz ENSI 33/593 festgehalten und konkrete Anforderungen spezifiziert» (ENSI 33/540, Seite 43, 2018).

1.2.7. «Aus Sicht der KNS bestehen im Hinblick auf die Konkretisierung bzw. Umsetzung eines Pilotlagers noch verschiedene Unsicherheiten, insbesondere bezüglich Umfangs und Inhalt von **Messungen zur Überwachung eines Pilotlagers** für HAA bzw. SMA, bezüglich der Interpretation bzw. Interpretierbarkeit der erfassten Messwerte sowie bezüglich der Gewährleistung der Übertragbarkeit der gewonnenen Erkenntnisse auf das Hauptlager. Im

Hinblick auf die Entwicklung eines schlüsselfertigen Konzepts für ein Pilotlager empfiehlt die KNS der Nagra, die genannten Aspekte aufzugreifen und entsprechende Abklärungen zu initiieren» (Empfehlung 2 KNS 2018, S. 29).

«Im Auflagenantrag A.2 hält das ENSI fest, dass im nächsten Entsorgungsprogramm vertiefter auf die Übertragbarkeit der gewonnenen Erkenntnisse im Pilotlager auf das Hauptlager mit Hilfe von Simulationswerkzeugen einzugehen ist. Zudem sind der Umfang und der Inhalt der Messungen im Pilotlager stufengerecht weiter zu konkretisieren ...» (ENSI, Mai 2023, S. 22).

«Allerdings erachtet das ENSI die Auswahl von nur zwei Überwachungsparametern Temperatur und Porenwasserdruck für die Überwachung des Pilotlagers im NAB 21-11 als zu gering. Die Argumentation dafür beruht überwiegend darauf, dass es nur für diese beiden Parameter sicherheitstechnisch hergeleitete maximal zulässige Werte gibt. Aus Sicht des ENSI wirkt dies zu einschränkend. Die Nagra wird in Rahmen der Dokumentation des Rahmenbewilligungsgesuchs die Parameterauswahl neu evaluieren und gegebenenfalls anpassen» (Gutachten ENSI, Mai 2023, S. 21).

«Sie [KNS] ... nimmt zur Kenntnis, dass es sich bei diesen beiden, derzeit ausgewählten Parametern um eine Vorauswahl handelt, die auf dem aktuellen Kenntnis- und Projektstand basiert. Entsprechend geht sie davon aus, dass die Parameterauswahl im weiteren Verfahrensablauf bzw. in den weiteren Bewilligungsschritten weiter konkretisiert bzw. allenfalls erweitert wird. ... [NAB 21-11] Reaktionsplan für das Vorgehen beim Auftreten von unerwarteten bzw. a priori nicht erklärbaren Messwerten während des Monitorings der Pilotlager ... Dieser Plan ist – dem aktuellen Projektstand entsprechend – noch vergleichsweise grob und wenig spezifisch» (KNS 2023, S. 12).

1.2.8. «All questions regarding a realistic retrieval of radioactive waste: these should be demonstrated now, and **not in 20 years at a site-specific laboratory**. Such a realistic retrieval concept will certainly have an impact on the repository concept» (Bossart 2021).

1.2.9. HF Hydraulic fracturing mine-back experiment: expérience destinée à mieux saisir les effets de la fracturation et le régime de propagation de la fracturation hydraulique dans diverses situations du sous-sol géologique (Agreed Programme Proposal for Phase 23, 29 May 2017, appendix 1, p. 189-197).

L'expérience HF a été planifiée mais n'a finalement pas été réalisée : les quantités d'eau nécessaires pour la stimulation hydraulique étaient trop importantes ; Swisstopo ne voulait pas prendre le risque d'une inondation du laboratoire (Demande d'autorisation du 31 mai 2019 pour la phase 25, page 2).

- **L'expérience avait-elle un intérêt pour le projet du dépôt géologique profond ?**

1.2.10. Les effets du percement de la galerie FE sur la roche avoisinante, en particulier les changements de pressions, sont mentionnés dans le tableau 4 mais ne sont pas discutés dans les notes techniques (FE-A TN2014-48).

- **Les interprétations scientifiques de ces effets ont-elles fait l'objet d'une publication ?**

⇒ Nagra 21.11.2019 : « Non. Mais **les effets sont en cours d'analyse** et les effets similaires observés lors de l'expérience MB, des expériences à Mol, le fonçage du puits de Bure, des galeries de Bure (et autres) ont fait l'objet de nombreuses publications ».

- **Pourquoi depuis 2014 les mesures THM (Thermo-Hydro-Mechanical) obtenues ne font-elles plus l'objet d'une TN avec graphiques comme dans les années précédentes ?**

⇒ Nagra 21.11.2019 : « La quantité de données et la diversification des systèmes d'acquisition (DAS) a nécessité le développement d'une base de données dédiée à l'expérience FE. L'intégration des données dans cette base permet depuis 2018 la publication d'un data trend report compréhensif contemplant tous (ou presque) les senseurs FE (voir NAB 18-039, aussi publiée en tant que Technical Note : TN 2018-92). Malheureusement, la base de données de Soldata n'a pas pu être utilisée à cet effet ».

1.2.11. Des effets du percement de la galerie 2018 ont été ressentis et mesurés jusque dans la niche FE. **Cette influence au-delà de la main-fault fera l'objet d'une analyse particulière :**

- «Analysis of inclinometer data: ... Response during Ga 18 excavation observed in both shotcrete and ISS» (AN 20-168, Minutes of the FE-M Technical Discussion of 31 January 2020, Slide 31).
- «Relative humidity at far field/EDZ: most sensors failed due to the presence of water in the borehole; is the trend change in sensor BFEB028 due to the excavation of Gallery

18? Are they reliable? **Will be investigated**» (TD2021, FE-M Technical Discussion of 26 January 2021, Slide 12).

- «A change in the trend of measurements at sensor BFEB028 is observed and attributed to the excavation of Gallery 18 nearby» (FE TD 2022, 28.01.2022).

1.3. Qualitätssicherung der Forschung

1.3.1. «Generell ist aus dem Felslabor Mont-Terri eine sehr umfangreiche Datengrundlage vorhanden. Jedoch finden sich bei genauerer Analyse einige Lücken. Diese gilt es in den kommenden Jahren noch zu schliessen» (Landestopographie 2014).

1.3.2. Unabhängigkeit und Fachkompetenz des ENSI: «Es fehlt also eine Zweitmeinung, die dem ENSI wissenschaftlich Paroli bieten kann. ... Die Unabhängigkeit des ENSI-Rats ist bereits durch die Affäre Peter Hufschmied in die Kritik geraten, weil dieser ein Geschäftsverhältnis zur BKW hat. Hufschmied ist mittlerweile zurückgetreten. Auch Horst-Michael Prasser ist am 2. November 2011 zurückgetreten. Der ETH-Professor verletzte eindeutig die gesetzlichen Anforderungen, denn sein Lehrstuhl wird von der Swissnuclear, der Vereinigung der Schweizer AKW-Betreiber, bezahlt. Der ENSI-Rat wurde Ende November 2011 neu gewählt. Es bleibt zu hoffen, dass dieser in seiner neuen Zusammensetzung der notwendigen Unabhängigkeit gerecht werden kann» (Frage 73 TFS 2012; SES 2011, S. 13).

1.3.3. «Das ENSI untersteht der Aufsicht des Bundesrates. Das ENSI verfügt neben der Geschäftsleitung auch über ein strategisches Organ, den ENSI -Rat. ... Die Kommission für nukleare Sicherheit (KNS) steht dem Bundesrat, dem UVEK und dem ENSI als unabhängiges beratendes Organ zur Verfügung» (Antwort BFE 2012).

1.3.4. Unabhängigkeit der Nagra-Forschung: «Werden Forschungsergebnisse der Überprüfung durch die «Wissenschafts-Community» unterzogen und halten dieser stand, kann davon ausgegangen werden, dass es sich um fundierte Ergebnisse handelt. Zu diesem internationalen Reviewprozess (Peer Review) gehört die Publikation von Artikeln in Fachzeitschriften sowie die Präsentation an Tagungen und Kongressen» (Frage 71 TFS 2012) (Antwort BFE 2012).

1.3.5. «Die Nagra wird direkt von den AKW-Betreibern finanziert. Ausser der Nagra arbeitet niemand an der Entsorgung des Atommülls, eine Zweitmeinung fehlt. Die Nagra betreibt keine unabhängige Forschung. Zudem existiert keine Zweitmeinung. Die Nagra hat sozusagen ein Forschungs-, Wissens- und Entscheidungsmonopol, was für ein derart sicherheitsrelevantes, komplexes und neuartiges Vorhaben nicht zielführend ist (SES 2011, S. 12).

1.3.6. Ressourcen für die Forschung: «Die Ausgaben für Etappe 3 sind noch nicht festgelegt. ... Die Kosten der Nagra für die Tätigkeiten für die Standortwahl im Rahmen des Sachplans geologische Tiefenlager belaufen sich für schwach- und mittelaktive sowie hochaktive Abfälle zusammen auf rund 20–80 Mio. CHF/Jahr» (Frage 54 TFS 2011; Antwort BFE 2011).

1.3.7. «Der AdK empfiehlt, der Einhaltung wissenschaftlich-technischer Standards insbesondere auf dem Gebiet der Geomechanik, der Methodik (Sicherheitsnachweis) sowie der entsprechenden behördlichen Überwachung verstärkt Beachtung zu schenken. Die Fachbereiche, Daten, Wissensbestände und Erkenntnisse sind plausibel zusammenzuführen (AdK 2017, E5, Seite 7).

1.3.8. Die Qualität der Versuche der Nagra wird stark in Frage gestellt (ETHZ, von Moos 2015).

1.3.9. Einige **kritische Hinweise bezüglich Qualitätssicherung** bei Experimenten HT, MA, BN, EG, CS (TD-216, Tecova 2012).

1.3.10. Evaluation of investigation techniques. Questions and experiments (WP23, Table 1, 2017).

1.3.11. Figures 2-7 to 2-11 illustrate predictions of the evolution of temperature and humidity over time (NTB 15-02, pages 20-23, 2.4 Scoping of the FE Experiment).

- **It would be interesting to show also the prediction curves of the previous models bevor their calibration with the results of HE-E.**

⇒ Nagra 21.11.2019: «See figures added at the end of the document and numerous presentations (e.g. clay conference 2017)».

1.3.12. «... THM modelling and THM understanding. These elements are more appropriately assessed using scientific readiness levels. However, such an analysis will not be undertaken

for the FE Experiment until a comprehensive comparison of the modelling studies and associated THM predictions to monitoring results has been completed» (NTB 15-02, page 129-130, 8.4 Feedback to reference design – TRL assessment)

- Also if a comparison with the models would not give satisfaction, this must be communicated to assess the limitation of the modelling.

⇒ Nagra 21.11.2019: «Agreed! The newly implemented FE-Modelling Task Force is dedicated to an in-depth assessment of the possibilities and limitations of modelling».

1.3.13. «... it is envisioned that these models will be calibrated against the early results of the Experiment, to support further interpretation of the monitored data and further development of current predictive capabilities» (NTB 15-02, page 115-116, 7.4 Summary of the heating phase).

- Are the differences between prior models values and the measured one explainable?

⇒ Nagra 21.11.2019: «A predictive-evaluation exercise of the near-field evolution was carried out using the multiphase flow code TOUGH2 (Papafotiou et al 2018). In this context, the temperature evolution in the bentonite was predicted and 95% confidence limits of temperature evolution in the buffer were provided. After 3 years monitoring phase, the predictions were analysed. Very good matches were gained – all measured temperature transients remained in the 95% confidence intervals, indicating that the thermo-hydraulic model performed well.

Predictive modelling of the THM evolution in the host rock has not yet been initiated. It is planned to specify a prediction-evaluation exercise for the host rock as part of the new FE-Modelling Task Force».

1.3.14. In the table IV-1 the Borehole BFEA005 is mentioned to be equipped with 6 sensors IST AG PT1000 for temperature measurements (NTB 15-02, page IV-2) (voir aussi FE-A TN2014-48).

- Has the failure of 2012 been fixed?

⇒ Nagra 21.11.2019: «As reported in TN 2012-16, only sensor number 4 was broken during the time of the installation, this sensor could not be replaced and up to this day does not provide any data. Other 5 sensors have been working without any problem since the beginning of the experiment».

- Connait-on les causes des sondes défectueuses ?

⇒ Nagra 21.11.2019: « Nous faisons référence à «data trend report 2018 & 2019» NAB 2018-039, NAB 2019 (in prep) ».

- Are the defective sensors listed with explanations elsewhere?

⇒ Nagra 21.11.2019: «Defective sensors are shown in TN 2018-92 throughout the report. A list with possible explanations (when possible to explain) will be added to the data trend report which is in production at the moment».

Several safety assessment-related RD&D activities are currently underway or planned:

1.3.15. «The handbook on uncertainty management (Smith et al. 2019) will be updated based on hands-on experience during the application of the methodology and considering input from international collaboration, e.g. through the EURAD UMAN network. Emphasis will also be placed on methods for quantifying risk, a requirement associated with Protection Objective 2 in ENSI (2020)» (NTB 21-02, S. 244).

Sicherheitsnachweis: «Für den Sicherheitsnachweis sind Daten, Prozesse und Modellkonzepte gemäss Stand von Wissenschaft und Technik zu verwenden und deren Unsicherheiten aufzuzeigen. ... systematische Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalyse zur Ermittlung des Einflusses von Unsicherheiten in den Daten, Prozessen und Modellen auf die Berechnungsergebnisse» (ENSI G03, 2020, pages 10 et 21).

2. 2. Geologie

2.1. Opalinuston

2.1.1. «Does a repository in a claystone really perform as predicted? Requires long-term demonstrators» (Bossart 2018, 2019). «A fundamental set of questions are: does repository for high-level radioactive waste in a claystone really work as predicted (i. e. as the models say)? Do we understand all the processes, and do they run in a staggered manner? » (Bossart, 2021).

2.1.2. Experiments (completed and **planed**) for Characterization of clay formation (WP 23, Table 2, page 29, 2017).

2.2. Sandy facies versus shaly facies

2.2.1. «THM behavior, engineering advantages compared to shaly facies? (Bossart 2018). Experiments in the sandy facies of the Opalinus Clay: in the last 25 years, we have focused on the clayed type (shaly facies) of the Opalinus Clay, thoroughly investigating all its aspects. But we kept away from investigating the sandy type. Research has showed, however, that the **sandy facies may have advantages that we previously overlooked**. ... Other key research targets are new diffusion experiments where radionuclides diffuse into the clay in a thermal field. ... In addition, a large sealing experiment, the so-called Sandwich Experiment was started» (Bossart 2021).

2.2.2. «Für die Parameter aus der Hydraulik ist der Wissensstand insbesondere bei der sandig karbonatreichen und der sandigen Fazies eher dürftig. ... Vergleichswerte aus der sandigen oder sandig karbonatreichen Fazies sind bis dato **keine** vorhanden» (Landestopographie 2014).

2.2.3. «In den Phasen "2. Einbau" bis "5. Radionuklid-Transport" wurde in der sandigen Fazies hingegen praktisch nichts gemacht. Dies betrifft dabei die Quelleigenschaften, Tunnelkonvergenzen, Liner-Alteration, Kanister-Korrosion mit Gasproduktion, thermischen Eigenschaften, die geochemischen und mikrobiellen Prozesse und den Radionuklidtransport. Bei all diesen wichtigen Teil-Prozessen der Entwicklung des Endlagers **muss in Zukunft verstärkt die sandige Fazies miteinbezogen** werden» (Landestopographie 2014).

2.2.4. «The in-situ and laboratory investigation indicate that the Opalinus clay is **neither water- nor gas-tight**. For long-term safety aspects it has to be taken into account that generated and released gases can migrate into open areas of the repository and water can migrate within the Opalinus clay formation» (HE-B, GRS Heater Test in the Opalinus Clay of the Mont-Terri URL, 2006).

- **What are the conclusions regarding the adequation of clay rock for the repository?**

2.2.5. «Increasing relevance of sandy facies, which is poorly characterised, as potential host rock for a repository: For the Swiss (ENSI, Nagra, Swisstopo) and the German (BGR, GRS) Partners the relevance of the sandy facies is becoming of major interest. Firstly, this facies is occurring in the potential siting regions in northern Switzerland and southern Germany and, secondly it offers better geotechnical properties (i.e. higher compressive strength) for the construction of a repository compared to the shaly facies. During the last 20 years, few data were acquired on the sandy facies since the focus was mainly set on the shaly facies. The hydraulic dataset (porosity, permeability, specific storativity, parameter variability, heterogeneity, extrapolation to other sites) of the sandy facies is poor. The rock mechanical behavior (elastic, plastic, damage) of the **sandy facies is also badly known**. There are few data on the Excavation Damage Zone (EDZ) since it seems to be less developed as in the shaly facies. The thermal dataset (heat capacity, heat conductivity) and the diffusion properties (i.e. in-situ diffusion coefficients) are completely missing for the sandy facies. All available thermal data have been collected in the shaly facies so far. There are no or very few data on the gas entry pressure for the sandy facies. **Therefore, there is a significant need to investigate the sandy facies to fill this crucial gap**.

The characterization of the surrounding aquifers is also of prime importance for the research on deep geological radioactive waste disposal since they defined the boundary conditions for the Opalinus Clay» (Technical Report 2015-02, December 2016. New research program for the extension of the rock laboratory in 2018-2020: Strategic report).

- **Quelles expériences réalisées dans le faciès argileux devront être répétées dans le faciès sablonneux ?**

⇒ Nagra 21.11.2019: «During the extension of Mont-Terri, significant additional knowledge was gained regarding the sandy facies especially in terms of geomechanical properties including EDZ formation and convergence (e.g. GC-A experiment, TS experiment). This allowed to complete our clay database. From Nagra's point of view relevant information from the sandy facies has now been accumulated and no duplication of experiments already conducted is required for the preparation of the general licence application, **unless** the deep drilling campaign results in unexpected results that would require **such experiments**. ... The clay content of the OPA of the preferred location for the

repository is currently not known, neither is its stress date or tectonic setting. ... no duplication of experiments already conducted is required for the preparation of the general licence application, unless the deep drilling campaign results in unexpected results that would require such experiments».

2.2.6. «Da Simulationswerkzeuge auf Modellkonzepten basieren, ... Ob mit Simulationswerkzeugen das angestrebte Ziel, das Prozessverständnis zu verbessern und die zu erwartenden Unterschiede zwischen Pilotlager und Hauptlager aufzuzeigen, erreicht werden kann, ist aus Sicht der KNS fraglich. Dies auch, da eine Validierung der verwendeten Modelle auf Basis der Messdaten aus dem Pilotlager aufgrund des begrenzten Beobachtungszeitraums kaum möglich sein dürfte» (KNS 2023, S. 13).

2.2.7. «8.2.2.3. Geomechanical processes: From a safety perspective, the critical geomechanical process with the potential to impair barrier integrity is therefore fracturing associated with fracture dilation. ... maintaining the fluid pressure well below the levels needed for fault reactivation is a crucial aspect of repository design.

At the Mont-Terri Rock Laboratory, excavation rate and convergence data indicate **strong differences between the shaly facies and sandy facies of the Opalinus Clay** (Lanyon et al. 2014b), as well as across fault zones within the same facies (Thöny 2014). ... However, even considering such variability, based on experience from the hydrocarbon industry **it can be demonstrated that the Opalinus Clay has mechanical properties that are comparable to many of the shales that have acted as effective top seals in hydrocarbon reservoirs, even when they are extensively faulted** (Fisher et al. 2013).

In summary, Opalinus Clay exhibits **brittle behaviour** under repository-relevant conditions (both during excavation and during long-term evolution) characterised by the **generation of fractures**. Fractures may control fluid flow if dilation occurs, but this requires the maintenance of high pore pressures or low effective stresses (1 to 2 MPa). Otherwise, mechanical closure and self-sealing processes (Section 8.2.2.5) determine the hydraulic properties of fractures.

...
Fault material from Mont-Terri and Nagra's deep boreholes will also **be further characterised** by various imaging techniques and laboratory tests. Active in-situ testing (hydraulic and geomechanical) in the deep boreholes will further complement Nagra's qualitative and quantitative understanding of self-sealing in the Opalinus Clay» (NTB 21-02. S. 159-160).

Rappel: André Herrmann: «Eine klar definierte **Konditionierung der Proben** (z.B. bei 97% relativer Luftfeuchtigkeit) muss standardmässig durchgeführt werden, um die Vergleichbarkeit der Datensätze untereinander zu erhöhen» (2.5.10.); «Für die Laborversuche braucht es **Leitlinien** für die Auswahl und Vergleichbarkeit der zu prüfenden Bohrkerne sowie eine Liste der durchzuführenden Versuche» (2.5.15.).

2.3. THM

2.3.1. «Das grundsätzliche Verständnis der thermischen Auswirkungen auf das Wirtgestein, auch in grösserem Massstab, wird insbesondere durch die Überwachung (Monitoring) von grossmassstäblichen Experimenten beurteilt» (Nagra 2016, Tab. 3-3 Seite A-24).

2.3.2. Overhead nearfield? (Frage 93 TFS 2012 und Antwort Nagra 2014).

2.3.3. «Bei den thermischen Parametern ist die **Abhängigkeit vom Quarzgehalt** erkannt worden, jedoch liegen keine grösseren Datensätze vor. Zudem müssten **weitere Untersuchungen** faziespezifisch durchgeführt werden. ... Genauere Daten über die Abhängigkeiten zur Mineralogie **fehlen** jedoch bis dato» (Landestopographie 2014).

2.3.4. «8.2.1.2. Geological conditions: The facies of the lower and especially of the upper confining units can vary considerably on a regional and local scale. A combined litho- and biostratigraphic study of outcrops allowed this variability to be better characterised in the case of the Passwang Formation, which directly overlies the Opalinus Clay in Jura Ost (Wohlwend et al. 2019b). The transition at the top of the Opalinus Clay to this formation, as well as its equivalents to the east, was investigated in detail using new approaches, such as high-resolution X-ray fluorescence (XRF) scanning (Lauper et al. 2020). These studies indicated differences between the siting regions, e.g. in the **occurrence and extent of "hard beds"** such as calcareous and/or quartz-rich beds, which **will be considered in the safety analyses**.

... The Zürich Nordost siting region is only weakly affected by compressional deformation related to Late Miocene Alpine collision tectonics. ... Based on newly available pre-stack

depth-migrated 3D seismics, a quantitative analysis of these structures has been provided, indicating that the rheologically weak Opalinus Clay strongly influenced the evolution and present-day architecture, which is characterised by vertical and lateral fault zone segmentation» (NTB 21-02, S. 134-135).

2.3.5. «8.2.2.4. Thermal effects: the Opalinus Clay reacts to a temperature increase with a rise in the porewater pressures and associated mechanical effects on the solid skeleton, potentially leading to fracture initiation in the intact rock mass or fault reactivation in a tectonically overprinted rock mass. ... Pore pressures have to remain below a specified threshold to ensure that the natural barrier is not subject to potential sub-seismic damage (creep) or induced seismicity. This threshold defines a performance target relevant to the repository-induced effects of hydraulic overpressures. Mechanical (plastic) deformation and the associated impacts on the hydraulic rock properties that could occur if the threshold is exceeded are discussed in Section 8.2.2.3. ... Development and benchmarking of probabilistic assessment workflows, aimed at evaluating the likelihood of thermally induced fracture re-activation at the potential repository sites in Northern Switzerland. ... The HE-E and FE experiments at the Mont-Terri Rock Laboratory will be continued for several years» (NTB 21-02, S.161-163).

2.3.6. «8.5.2 Re-saturation, temperature evolution and gas transport in the near- field. 8.5.2.1 SF/HLW near-field: The Full-scale Emplacement (FE) experiment started in early 2010 at the Mont-Terri Rock Laboratory and is a full-scale multiple heater test in the Opalinus Clay (Müller et al. 2015, Nagra 2019a). The main objective of the FE experiment has been to investigate SF/HLW repository-induced THM coupled effects on the host rock at repository scale and to validate existing coupled THM models. Observations during the first five years largely confirmed Nagra's existing understanding (Lanyon et al. 2020). A dedicated prediction-evaluation exercise aimed at predicting the FE near-field evolution during the first three years after the onset of heating (Papafotiou et al. 2018) has provided valuable insight into the predictive capability of existing TH modelling approaches. Modelling benchmarks with different THM codes as part of the international FE Modelling Task Force (Section 8.2.2.4) built further confidence in the technical readiness of the existing THM modelling framework (Alcolea in prep.). ...

The MARIE indicator workflow, which has been developed for the assessment of the 13 site selection criteria according to the Sectoral Plan (SFOE 2008), will be revised to account for the latest results of the recent site investigation programme. ... Furthermore, new probabilistic features will be introduced in the modelling workflow to address the parametric and conceptual uncertainties of the HLW repository projects, as stipulated in Criteria Group 3 of the SGT (SFOE 2008).

... Long-term monitoring of the buffer saturation processes in the HE-E and the FE experiments at the Mont-Terri Rock Laboratory will be continued and will feed into the expansion of the existing database for THM model validation (input for EURAD and the FE Modelling Task Force).

Deterministic and probabilistic assessment of the parametric and conceptual uncertainties associated with the thermal pulse and gas release from a HLW repository is foreseen in the context of a broader initiative on probabilistic performance assessments» (NTB 21-02, S. 215-217).

2.3.7. «8.5.2.2 L/ILW near-field: A particular focus is on the temporal evolution of the distribution of water saturation and pore pressure as basic input to the assessment of radionuclide transport within the engineered barriers and also on the chemical and microbiological evolution of the L/ILW near-field. This latter aspect is covered in Section 8.2.2.6, where the extent to which chemical and microbiological processes could provide a sink for gas is also addressed. Processes such as water and hydrogen consumption, salt precipitation, iron and sulphate transfer in the unsaturated state and transfer of volatile gas components have to be addressed to further improve overall hydrochemical understanding.

... . It is possible that gas pressure will lead to pathway dilation in the Opalinus Clay. This process will not result in permanent damage to the favourable properties of the rock, since the microscopic dilated pathways are expected to close again once the gas pressure decreases. However, if pressures can be kept sufficiently low (e.g. through design measures) to exclude this process, this would simplify the analysis of the system and increase

robustness. Finally, gas pressurisation could potentially lead to the displacement of porewater in the near-field and far-field, thus affecting the retention in the Opalinus Clay.

The simulations suggest that the maximum gas pressure in the emplacement caverns is reached in the period between 1'000 and 10'000 years after repository closure. Gas overpressures can be limited by an engineering solution, the so-called Engineered Gas Transport System (EGTS).

A major component of the EGTS as an engineering solution for gas release along the backfilled structures of an L/ILW repository are gas-permeable seal sections (Section 8.4.8). The design, construction and operation of the full-scale Gas-permeable Seal Test (GAST) at the GTS is seen as a cornerstone in support of Nagra's safety concept for an L/ILW repository ...

Leupin et al. (2016c) and Diomidis et al. (2016) already concluded that the issue of gas pressure build-up can be addressed through appropriate design of the L/ILW repository and supported by additional engineering measures (e.g. the EGTS) if needed. A new criteria-based indicator workflow was developed, ... An assessment of the conceptual and parametric uncertainties associated with gas release in the L/ILW near-field will be conducted (Section 8.2.2.2)» (NTB 21-02, S. 218-220).

2.3.8. Les effets du percement de la galerie FE sur la roche avoisinante, en particulier les changements de pressions, sont mentionnés dans le tableau 4 mais ne sont pas discutés dans les notes techniques (FE-A TN2014-48).

- Les interprétations scientifiques de ces effets ont-elles fait l'objet d'une publication ?

2.3.9. «7.3.2 Hydraulic evolution: relative humidity in bentonite, tunnel wall and Opalinus Clay Water ... condensing in the outer parts of the bentonite where temperatures are lower» (NTB 15-02, pages 110-111).

- Does the condensed water produce aversive effects?

⇒Nagra 21.11.2019: «... Diese gekoppelten Prozesse können mittels THM-Modellierungen nachvollzogen werden. Im Rahmen umfangreicher Vorhersagemodellierungen wurde gezeigt (vgl. NTB 15-02), dass eine zuverlässige Abschätzung der gekoppelten Nahfeldprozesse grundsätzlich möglich ist. Insbesondere zeigen solche Modelle, dass Kondensationsprozesse im Kontaktbereich des Bentonits zum Opalinuston auftreten. Negative Auswirkungen dieser Kondensationsprozesse und der damit verbundenen radialen Aufsättigung des Bentonits wurden nicht beobachtet. Im Rahmen verschiedener internationaler Forschungsprojekte (BEACON, EURAD, EBS-Task Force, FE Modelling Task Force) werden die THM-Modellier-Werkzeuge im Rahmen von Benchmarks laufend überprüft und verbessert».

2.4. Selbstabdichtung

2.4.1. «Das Verständnis der Selbstabdichtung wird angesichts ihrer Bedeutung und wie sie sich auf Wasser- und Gastransport auch in der EDZ auswirkt, weiter verfeinert» (Nagra 2016, Tab. 3-3 Seite A-24).

2.4.2. «Das Prozessverständnis zur Selbstabdichtung im Opalinuston sollte anhand vertiefter Untersuchungen in Etappe 3 SGT verbessert werden» (KNS 2017).

2.4.3. «Die Thematik des Selbstabdichtungsvermögens ist auch für den angestrebten satten Kontakt zwischen Versiegelungsmaterial und Gebirge im Bereich der von der Nagra geplanten Zwischensiegel in den HAA-Lagerstollen von Relevanz» (KNS 2017).

2.4.4. «Hydraulische Versuche sollten, wenn möglich ausserhalb der EDZ oder gar ausserhalb der um Galerien herum hydraulisch beeinflussten Zone ausgeführt werden. Diese Zone trägt gemäss Erfahrungen aus dem LP (Long-term Monitoring of Pore Pressures) Experiment im Felslabor ca. 30 m. Von den 225 vorhandenen hydraulischen Tests waren ca. 2/3 beeinflusst und daher für die Evaluierung der natürlichen Variabilität nicht geeignet. Zudem sollen vermehrt „Crosshole-Test“ zum Einsatz kommen, damit die Variabilität der Speichereigenschaften des Opalinus-Tons noch genauer untersucht werden kann. Dies ist insbesondere auch wichtig im Hinblick auf die Verifizierung der aus Druckdaten bestimmten Speicherkoeffizienten (Matray & Bailly, 2014). ... Insbesondere sollten auch die Prozesse der Selbstheilung von künstlich induzierten Klüften in der sandigen Fazies untersucht werden» (Landestopographie 2014).

2.4.5. «Das Konzept der Selbstabdichtung ist in der bestehenden Lagerkonzeption im Hinblick auf die Langzeitsicherheit relevant (Selbstabdichtung der Auflockerungszone und

der Versiegelungsbauwerke). Aus Sicht der KNS ist noch nicht abschliessend gezeigt, dass die Selbstabdichtung im postulierten Umfang und im erwarteten Zeitraum wirksam wird bzw. werden kann, so beispielsweise unter dem Einfluss der temporären Temperaturerhöhung im HAA-Nahfeld. Arbeiten zum Verständnis des Prozesses und zur weiteren **Abklärung der Wirksamkeit der Selbstabdichtung** sind daher nach Einschätzung der KNS auch im Hinblick auf das RBG von Bedeutung» (KNS 2018, Anhang 1).

2.4.6. FS-B (Imaging the Long-Term Loss of Faulted Host Rock Integrity) experiment: «... injection experiment was conducted at 39.5 m below the URL's galleries across the **Main Fault** ... the Main Fault hydraulic transmissivity showed a non-linear hydraulic permeability decrease to an estimated value of about 9×10^{-10} m²/s. Compared to the 2020 experiment, the experiment conducted this week showed that the fault reactivated at the same injection pressure of about 5.3 MPa, and a similar hydraulic connexion occurred between the injector and the monitoring boreholes in gallery 2008. Thus, the first results are that **no apparent fault self-sealing** occurred during the one year period between the two activations» (Fieldreport 21_11_04, November 28).

2.4.7. «Das Prozessverständnis für die wichtigsten sicherheitsrelevanten Phänomene ... Während der Stand der Technik in Bezug auf das Verständnis der **Selbstabdichtungsprozesse** im Wirtgestein ausgereift ist, haben neuartige, kleinskalige Visualisierungsexperimente die schnelle Selbstabdichtung künstlicher Klüfte **überzeugend nachgewiesen**» (NTB 21-02, 2. Teil, S. X).

2.4.8. «6.2.3. Self-sealing processes: These refer to understanding the development and the geometry of the excavation damaged zone (EDZ) and the evolution of its hydraulic properties over time. The self-sealing processes will be confirmed in tandem with an experiment on the gas transport capacity of the EDZ. Similar experiments already conducted in the Mont-Terri Rock Laboratory indicate that an experimental time-frame of two to three years has to be foreseen for the self-sealing aspects of such experiments.

Gas transport capacity in the host rock: Gas transport properties and their spatial variability will be mapped based on laboratory samples **to determine whether they are within the expected range** of parameter values.

Thermal impact on the host rock and the EBS (HLW repository only): Current understanding based on the HE-E and FE experiments at Mont-Terri suggests that maximum **overpressures will be generated one to three years after heating starts**. However, it might be **worthwhile** continuing these experiments over longer timeframes» (NTB 21-02, S. 93).

2.4.9. «8.2.2.5. ... The sealing of reactivated faults is being investigated as part of the FS-B/C (Fault Slip) experiments at the Mont-Terri Rock Laboratory, where fault rupture zones induced during the Fault Slip experiment (Guglielmi et al. 2020) are being characterized. ... the continuation of in-situ experiments in the Mont-Terri Rock Laboratory **to further characterise fracturing and self-sealing is foreseen**. The possibility exists to acquire long-term data (10+ years) from the excavation damaged zone (EDZ) where re-saturation has occurred and **self-sealing is expected to occur**, such as in the FE tunnel, where natural re-saturation occurs and repeat hydraulic testing in the EDZ is possible» (NTB 21-02, S. 165-166).

2.5. Geomechanik

2.5.1. «Die Bewertung bezieht die Anisotropie auf Gesteinsmassstab nicht ein, obgleich eine mittlere bis starke **Festigkeitsanisotropie** im Fall des Opalinustons auf Laborskala festgestellt werden kann. ... (Erfahrungen aus dem Felslabor Mont-Terri). Dies kann zusammen mit den niedrigeren Festigkeiten der Trennflächen eine relevante Gebirgsanisotropie zur Folge haben. Bei allen Wirtgesteinen wird mit der Begründung "mittlere bis hohe Festigkeit in den Schichtfugen" kein Abzug vorgenommen. Diese Auffassung wird **nicht** geteilt» (ETHZ 2009).

2.5.2. «Mangelhafte Versuchsdurchführung von **Triaxialversuchen**» (AdK, Kovári, 2a).

2.5.3. «Referenzprojekt (mit einer durchdachten Lagerkonzeption) entwickeln» (AdK, Kovári, 2a).

2.5.4. «Ungewissheiten» (AdK, Baltés, 4).

2.5.5. «Allerdings zeigt der Stoffansatz der Nagra, welcher von den Experten als zutreffend erachtet wird, dass mit einer zunehmenden Festigkeit und Steifigkeit mit zunehmender Tiefe zu rechnen ist. Im relevanten Tiefenbereich zwischen 400 und 900 m wird dieser Effekt von der Nagra nicht berücksichtigt und kann anhand der **vorliegenden Laborversuche nur für**

die Steifigkeit aber nicht für die Festigkeit quantifiziert werden kann» (Expertenbericht zu Etappe 2, Ingenieurgeologie ETHZ 2015).

2.5.6. «Die meisten triaxialen Druckversuche, die von der Nagra zur Festlegung der effektiven Festigkeitsparameter verwendet wurden, erfüllen nicht die Anforderungen an eine belastbare Versuchsdurchführung nach Stand der Technik. ... Kein einziger Versuch, der für Opalinuston untief herangezogen wurde, kann diese Kriterien erfüllen. Um zuverlässige effektive Festigkeiten zu bestimmen, sind weitere Versuche entsprechend dem Stand der Technik auszuführen» (ETHZ, von Moos, 2015).

2.5.7. «Jeder Qualitätsstufe ist ein Gewichtungsfaktor zugeordnet. Der effektive Reibungswinkel und die effektive Kohäsion wurden durch die Nagra anhand einer Regressionsanalyse mit den gewichteten Versuchsergebnissen festgelegt. Die von der Nagra verwendeten Gewichtungen widersprechen erheblich der Bewertung durch die Experten und der Tatsache, dass der Grossteil der Versuche höchstwahrscheinlich an teilgesättigten Prüfkörpern durchgeführt wurde» (ETHZ, von Moos, 2015).

2.5.8. «Eine qualitative Beurteilung der Experten ergab, dass die von der Nagra vorgeschlagenen effektiven Festigkeitsparameter die tatsächliche Festigkeit tendenziell überschätzen. Das Ausmass dieser Überschätzung ist nicht quantifizierbar» (ETHZ, von Moos, 2015).

2.5.9. «Bei den Parametern der Felsmechanik ist die Datenlage trotz grösseren Datenmengen ziemlich heterogen. Insbesondere die unterschiedlichen Sättigungsbedingungen, bei denen die Testreihen durchgeführt worden sind, erschweren die Vergleichbarkeit der Testreihen untereinander. Zudem ist vor allem die tonige Fazies aus dem Toarcium umfassend getestet worden. Aus dem Aalenium und insbesondere dem obersten Teil der tonigen Fazies gibt es viel weniger Daten. ... die Streuung der Kennwerte ist aber sehr hoch und klare Vorhersagen für Festigkeiten aufgrund der angetroffenen Geologie lassen sich wegen dem Problem der repräsentativen Probenentnahme momentan noch nicht machen» (Landestopographie 2014).

2.5.10. «Die Untersuchungen aus der sandigen Fazies in der TT-Nische haben gezeigt, dass für felsmechanische Parameter Probenzylinder von 51x120 mm wenig repräsentativ sind. Zudem müssen in Zukunft bei allen felsmechanischen Untersuchungen von den Probenkörpern jeweils die Wassergehalte oder die Saugspannung angegeben werden. Eine klar definierte Konditionierung der Proben (z.B. bei 97% relativer Luftfeuchtigkeit) muss standardmässig durchgeführt werden, um die Vergleichbarkeit der Datensätze untereinander zu erhöhen» (Landestopographie 2014).

2.5.11. Hydraulische und auch felsmechanische Kennwerte sollten vermehrt im Aalenium der tonigen Fazies, in der sandig-karbonatreichen Fazies und in der sandigen Fazies erhoben werden. Aus dem Aalenium des Opalinus-Tons sind im Gegensatz zum Toarcium nur wenige belastbare hydraulische Daten (ausserhalb der EDZ) vorhanden (Landestopographie 2014).

2.5.12. «Die Datenbasis für die Ermittlung der undrainierten Scherfestigkeit S_u ist zum grossen Teil nicht dafür geeignet, da die Versuche an teilgesättigten oder sogar künstlich getrockneten Prüfkörpern durchgeführt wurden» (ETHZ, von Moos, 2015).

2.5.13. «Die von der Nagra vorgeschlagenen Werte der undrainierten Scherfestigkeit überschätzen die tatsächliche undrainierte Scherfestigkeit. Sie sind ausserdem nicht konsistent mit S_u -Werten, die sich aus den effektiven Festigkeitsparametern unter Bedingung der Volumenkonstanz berechnen lassen, und Angaben aus der Literatur» (ETHZ, von Moos, 2015).

2.5.14. «Für Opalinuston untief liegen keine Laborergebnisse vor, die eine zuverlässige Bestimmung des undrainierten E-Moduls zulassen» (ETHZ, von Moos, 2015).

2.5.15. «Anstatt von «robust geomechanical tests» oder «more robust testing protocols» (NTB 16-02, S. 129) zu sprechen, sollte präziser beschrieben werden, wie die erwartete grosse Menge von verwertbaren Bohrkernen aus den geplanten Sondierbohrungen der Etappe 3 untersucht werden soll. Die klare Angabe von Umfang, Zweck und Ablauf der geplanten Untersuchungen der Bohrkernsowie deren Einfluss auf die Entscheidungsfindung im Sachplan ist von grosser Bedeutung. Für die Laborversuche braucht es Leitlinien für die Auswahl und Vergleichbarkeit der zu prüfenden Bohrkernsowie eine Liste der durchzuführenden Versuche. ... Die Konditionierung der Bohrkerns nach der

Entnahme, die Aufsättigung sowie die Kontrolle des Porenwasserdrucks bei den Triaxialversuchen sollten korrekt protokolliert werden» (AG SIKA/KES 2019, S. 9).

2.5.16. «Wie die Beobachtungen im Felslabor Mont-Terri zeigen, ist besonders auch mit spröden Bruchmechanismen zu rechnen, welche in dieser Form mit den verwendeten Stoffmodellen nicht reproduziert werden können» (ETHZ 2009).

2.5.17. «8.2.1.3 Geomechanical conditions: Mechanical properties: The Opalinus Clay exhibits transitional deformation behaviour between hard soils and weak rocks, which makes geomechanical testing of the material challenging. ... The question of how representative laboratory tests are for rock mass properties in Opalinus Clay is addressed by performing larger-scale in-situ tests, specifically pressure-meter tests (Marsland & Powell 1990) or dilatometer tests (Zalesky et al. 2007). A detailed comparison of rock stiffness test results from laboratory plugs and from in-situ tests is currently underway at the Mont-Terri Rock Laboratory as part of the Geomechanical Characterisation experiment (GC-A); it is also planned to perform the same analyses in one of Nagra's deep boreholes. ... The database of static and dynamic elastic properties of the Opalinus Clay will be further increased by dedicated field and laboratory testing programmes in the Mont-Terri Rock Laboratory (Geomechanical Characterisation, GC-A)» (NTB 21-02, S. 139).

3. 3. Lagerkonzepte und Materialien

3.1. Grundlagen

3.1.1. «Im Hinblick auf das weitere Vorgehen macht die KNS einige Hinweise und Empfehlungen. Die wichtigsten betreffen:

Die Überprüfung der Lagerkonzepte im Hinblick auf die lagerbedingten Einflüsse, die minimale Verletzung des Wirtgesteins und die mögliche Tieferlegung des HAA-Lagers (KNS 2010, S. 1). Im Hinblick auf die minimale Schädigung des Wirtgesteins, sind im Wirtgestein unnötige Bauten zu vermeiden und notwendige Bauten möglichst kleinräumig zu halten. Dies gilt insbesondere für bautechnisch anspruchsvolle Wirtgesteine wie Opalinuston. Die bisher dargelegten Lagerkonzepte berücksichtigen dies nach Auffassung der KNS nicht oder zu wenig konsequent» (KNS 2010, S. 44).

3.1.2. «Grössere Tiefenlagen für das HAA-Lager eröffnen mehr Alternativen für Standorte, bieten besseren Schutz gegen Erosion und gewährleisten eine bessere Selbstheilung. Die maximal mögliche Tiefenlage eines Lagers aus Sicht der bautechnischen Machbarkeit hängt ausser von den bautechnischen Eigenschaften des Wirtgesteins vom Lagerkonzept ab. Die bisher dargelegten Lagerkonzepte lassen daher nur eine begrenzte Tiefenlage zu» (KNS 2010, S. 45).

3.1.3. «Die Entsorgungspflichtigen haben bei der Evaluation einer Kombilager-Lösung aufzuzeigen, welche Konsequenzen sich aus möglichen Wechselwirkungen der einzelnen Lagerteile eines Kombilagers ergeben» (Auflagenantrag A2, ENSI 33/592).

3.1.4. «A.8.3 Auflage 5.3 Konsequenzen Kombilager: ... NAB 19-15 (Nagra 2020a) umfasst Informationen zu Wechselwirkungen hinsichtlich des Baus und Betriebs ... Durch eine geeignete Auslegung und Anordnung der einzelnen Lagerteile und durch geeignete Betriebsabläufe wird gewährleistet, dass bauliche und Betriebliche Wechselwirkungen zwischen SMA- und dem HAA-Lagerteil eines Kombilagers zu keiner sicherheitsrelevanten Beeinträchtigung führen» (Nagra NTB 21-01).

3.1.5. «Die Entsorgungspflichtigen haben mit dem Rahmenbewilligungsgesuch ein Konzept für die Nullmessung vorzulegen» (Auflagenantrag A4, ENSI 33/592).

3.1.6. «Die vernetzte Darstellung einzelner Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten miteinander und mit den Meilensteinen und Entscheidungen bei der Realisierung eines geologischen Tiefenlagers ist bis zur nächsten Aktualisierung des Entsorgungsprogramms weiterzuentwickeln» (Auflagenantrag A7, ENSI 33/592).

3.1.7. «Ergänzend zu den von der Nagra vorgesehenen Arbeiten (NTB 16-02, Kapitel 7.3.4) sind die in der Aktennotiz AN-9765) zusätzlich genannten Forschungsaktivitäten hinsichtlich Brennelement-Alterung und Trockenlagerung in den zukünftigen RD&D-Plänen zu berücksichtigen» (Auflagenantrag A10, ENSI 33/592).

⇒ Nagra 21-01: A.8.7 Auflage 6.1 zur Langzeitstabilität von abgebrannten Brennelementen: «Es kann indessen a priori nicht vollständig ausgeschlossen werden, dass durch eine Schädigung einzelner Hüllrohre eine Freisetzung von Radioaktivität aus dem Brennstoff oder allenfalls von Bestandteilen der Strukturmaterialien (sogenannter

"Debris") in der Umladezelle der Brennelementverpackungsanlage erfolgt. ... Für die Langzeitsicherheit sind intakte Hüllrohre keine Voraussetzung; ihre Barrierenwirkung wurde in den bisherigen Langzeitsicherheitsanalysen nicht berücksichtigt (Kap. 3.1.2). Das Verhalten von Brennelementen während der Langzeittrockenlagerung ist Gegenstand eigener Untersuchungen, ... die Integrität während der Trockenlagerung für den weitaus grössten Teil der Hüllrohre gewährleistet ist, da z.B. wegen der Inertatmosphäre keine signifikanten Korrosionsprozesse erwartet werden und Sekundärschäden durch Hydrid-Reorientierung ohne Primärschäden ausgeschlossen werden können. ... keine signifikanten Schäden an Brennelementen durch Alterung und Trockenlagerung zu erwarten sind ...».

3.1.8. «Die Lagerkonzepte sollen noch in Etappe 2 einer grundsätzlichen Überprüfung unterzogen und die entsprechenden Forschungsprojekte mit hoher Priorität bearbeitet werden. In die Überprüfung soll das gesamte Spektrum von machbaren Konzepten einbezogen werden, die dem EKRA-Konzept genügen. Die Ergebnisse dieser Überprüfung sollen den im Sachplanverfahren involvierten Fachgremien des Bundes und der Kantone zur Beurteilung unterbreitet werden» (Empfehlung 5, Lagerkonzepte, KNS 2011, S. 22).

3.1.9. «Erschliessungsvarianten: **Erschliessungsvarianten** mit Vertikalschächten ohne Rampen sollen umfassend abgeklärt werden» (Empfehlung 4, KNS 2011, S. 21; TFS Frage 157).

3.1.10. «Im Hinblick auf die minimale Schädigung der Wirtgesteine sollen einerseits die Querschnitte der **Ausbrüche möglichst klein gehalten** und andererseits nur die notwendigsten Bauten im Wirtgestein platziert werden.

Der Opalinuston ist hinsichtlich lagerbedingter Einflüsse anspruchsvoll. Nach Ansicht der KNS muss deshalb auch für das SMA-Lager ein Konzept gewählt werden, bei dem die Bauten im Wirtgestein möglichst **kleine Querschnitte** haben. Die Dimension der Lagerbehälter sind gegebenenfalls entsprechend anzupassen» (KNS 2011).

3.1.11. « Outre ces principes généraux, le Canton rappelle deux conditions d'exploitation pour la phase 20 :

- Le suivi minier (avec l'état actuel d'éventuelles déformations) doit être assuré et documenté en détail.
- La modélisation de l'EDZ du tunnel, réalisée sur les observations des parois du tunnel, ainsi que les mesures géophysiques doivent être documentées en détail dans un rapport final.
- ... »

(RCJU, Autorisation Phase 20, Expérience FE [rappel 2, p. 93-97])

3.1.12. «During the first 18 months of heating, the tunnels walls are converging at a nearly constant rate. An upward movement of the heaters in the early heating phase is associated with the thermal expansion of the pedestal and is followed by a gradual downward movement of the heaters (NTB 15-02, page 116).

• **What are the consequences of such movements of the tunnel walls?**

⇒ Nagra 21.11.2019: « Pour le moment, ces déformations sont mineures et sans conséquences. Il est vrai que le tunnel ne peut plus être visité, mais, voir prochaine réponse... Un suivi minier à proprement parler (incluant des visites d'observations) n'est pas possible. Néanmoins, chaque année les données de déformations du tunnel sont analysées. En 2019, en conséquence du creusement de l'extension, 2 analyses entières (Document de Andres Alcolea) ont été faites et les données étaient vérifiées par une personne de manière hebdomadaire (exemple d'un email en pièce jointe). Il est entendu que la galerie FE dans l'état actuel des choses ne peut pas être maintenue/rénovée ».

3.1.13. «In response to heating, the bentonite block pedestal expands resulting in an uplift of the heater of 1 – 2 mm ... At the same time, the heaters begin to subside slightly, owing to homogenisation of the buffer (NTB 15-02, page 123)

• **What are the consequences of such displacements?**

⇒ Nagra 21.11.2019 : «For the moment, those displacements are extremely small (mm scale) and we cannot think of any significant consequence. Nevertheless, we are, via modelling exercises, and later on by dismantling, **trying to understand this process** ».

⇒ Nagra 21-02, FE TD 2022: « Heaters move slightly upwards at the beginning of heating, then slightly downwards since mid-2015. Settlement **reaching sensor tolerance** ».

3.1.14. «... simulates aspects of the construction, waste emplacement, backfilling and early-stage evolution of a SF/HLW emplacement tunnel (NTB 15-02, page 1).

- Should the ILW concept not also be tested similarly to that for SF/HLW concept ?

⇒ Nagra 21.11.2019: «The feasibility of the emplacement of ILW as part of the conceptual design for the general licence application (2024) is currently not perceived as an aspect that needs to be demonstrated at the 1:1 scale».

3.2. Verpackung

3.2.1. Im Hinblick auf die Lagerbedingten Einflüsse, insbesondere die Gasbildung, sollen die folgenden Punkte berücksichtigt werden:

«Bei den Lagerbehältern für verglaste hochaktive Abfälle und abgebrannte Brennelemente soll die Verwendung der Behältermaterialien, welche im Tiefenlager nicht zur Gasbildung führen, untersucht werden. Dabei sollen auch die Grösse und die Konstruktion der Behälter hinterfragt werden».

«Metallische Abfälle sollen nach Möglichkeiten vermieden werden. Für kurzlebige und chemisch reaktive Abfälle, die nicht lange von der Biosphäre isoliert sein müssen, soll beim SMA-Lager allenfalls ein eigener Lagerbereich vorgesehen werden. Dieser soll vom Lagerbereich für die übrigen Abfälle getrennt sein und kann eventuell in einem Wirtgestein liegen, das nur reduzierte Anforderungen erfüllt» (KNS 2010, S. 45; Stellungnahme des ENSI zum Entsorgungsprogramm 2016 der Entsorgungspflichtigen; Stellungnahme der KNS, April 2018, KNS 02858).

3.2.2. «Thermische Effekte: Die Bestimmung der maximalen Temperaturbelastung im Nahfeld der hochaktiven Abfälle erfordert entsprechende gesicherte Stoffdaten (z. B. Wärmeleitfähigkeit) für die Bentonitverfüllung (oder mögliche alternative Verfüllmaterialien) und den Opalinuston. Zu berücksichtigen ist dabei auch die zeitliche Entwicklung dieser Stoffdaten. Entsprechende Experimente sind aus Sicht der KNS wesentlich und daher zu begrüssen».

«Glaskorrosion bei den verglasten HAA-Abfällen: Die am PSI laufenden Langzeit-Experimente zur Glasauflösung im Zusammenhang mit verglasten hochaktiven Abfällen aus der Wiederaufarbeitung sollen gemäss Angaben im RD&D-Plan beendet werden. Gründe hierfür werden nicht genannt. Derartige Experimente können nach Einschätzung der KNS experimentelle Daten liefern, die im Zusammenhang mit der Beschreibung des Prozesses der Glasauflösung und der Prognose dessen Langzeitentwicklung von grosser Bedeutung sind. Ohne genauere Details zur zeitlichen Planung der Experimente am PSI zu kennen, erscheint es der KNS lohnenswert, eine Weiterführung dieser Experimente in Betracht zu ziehen, sofern die technischen Randbedingungen dies zulassen» (KNS 2018, Anhang 1).

3.2.3. «Alle bisherigen und aktuellen ..., Korrosionsexperimente (IC, IC-A) ... sind in der tonigen Fazies durchgeführt worden. Zukünftige Nachfolgeexperimente sollten die sandige Fazies berücksichtigen» (Landestopographie 2014).

3.2.4. «How can we further optimize the engineered barriers of a repository? Other materials than steel? Ceramic? Demonstration of material performance?» (Bossart 2018, Bossart 2021; Frage 109 TFS 2014 und Antwort ENSI, Nagra 2016; Frage 51 TFS 2011 und Antwort ENSI 2011).

3.2.5. «Im Hinblick auf die weitere Konkretisierung der Lagerprojekte bleibt die Forschung und Entwicklung im Bereich möglicher Behältermaterialien für HAA und bei der Konditionierung von SMA ein wichtiges Thema. Entsprechende Arbeiten der Nagra sollten zielgerichtet fortgeführt bzw. intensiviert werden» (KNS 2017).

3.2.6. «... es ist grundsätzlich möglich, dass gewisse Konditionierverfahren aufgrund relevanter neuer Erkenntnisse modifiziert werden. ... werden verschiedene Varianten offengehalten» (Nagra 2016, Seite 23, s. Anhang A.2).

3.2.7. Varianten hinsichtlich Materialien und Auslegungskonzepte für die BE/HAA-Endlagerbehälter (Nagra 2016, Seite 85).

3.2.8. «Bezüglich HAA-Endlagerbehälter diskutiert die Nagra im NAB 16-42 ein breites Spektrum an möglichen Behältermaterialien, von denen jedoch nur die reinen Stahl- oder Gusseisenbehälter und die beschichteten bzw. ummantelten Eisenbehälter tatsächlich in Erwägung gezogen werden. Das ENSI beurteilt aus heutiger Sicht die Darstellung der technischen Möglichkeiten als korrekt. Ein definitiver Entscheid bezüglich der HAA-

Endlagerbehälter wird jedoch erst im Rahmen der weiteren Schritte der Lagerrealisierung gefällt» (ENSI 33/592, Seite 20-21, 2018).

3.2.9. «E.9: Das ENSI empfiehlt der Nagra bis zur Rahmenbewilligung zu prüfen, inwiefern die international gewonnen Erkenntnisse auf **kupferbeschichtete Eisenbehälter** für die Endlagerung von HAA-Abfällen im Bentonit- und Opalinustonumfeld übertragen werden können und ob diesbezüglich weiterer Forschungsbedarf besteht» (ENSI 33/593, 2018).

3.2.10. «E.11: Das ENSI empfiehlt, den Kenntnisstand über die für das Nahfeld relevanten **chemischen Wechselwirkungen** (z. B. Zement-Bentonit- bzw. Zement-Opalinuston-Wechselwirkungen sowie der Wechselwirkungen zwischen Eisenkorrosionsprodukten und Bentonit) zu vertiefen und in der modelltechnischen Abbildung des Nahfelds zu berücksichtigen. Dazu sollten auch die zeitliche Veränderung der Aufsättigung des Nahfelds und die Veränderung von Sicherheitsfunktionen des Bentonit (z. B. Quell- und Sorptionsvermögen) bis zum RBG untersucht werden» (Kapitel 7.5.2.1, NTB 16-02; ENSI 33/593, 2018).

3.2.11. «E.13: Der aus der **Korrosion gebildete Wasserstoff** kann einen bedeutenden Einfluss auf die Behälterkorrosion (z. B. durch wasserstoffinduzierte Rissbildung) ausüben. Das ENSI empfiehlt deswegen, diesen Einfluss vertieft zu diskutieren und darzulegen» (Kapitel 7.5.3.1, NTB 16-02; ENSI 33/593, 2018).

3.2.12. «Kurzbeschreibung der Arbeitsschwerpunkte der nächsten Jahre (exklusive RD&D): Überprüfung der Konditioniermethoden: Die verwendeten bzw. vorgesehenen Konditioniermethoden werden kontinuierlich überprüft, **neue Konditionierverfahren werden evaluiert**. Weiter werden im Rahmen der Sicherheitsanalysen die kritischen Abfalleigenschaften (Gasbildung, Komplexbildner etc.) evaluiert» (Nagra 2016, Page A-21 Tab. A.3-2).

3.2.13. «Das ENSI hat in seinem Gutachten für Etappe 2 SGT festgehalten, dass der **Einfluss von Eisen und der Eisenkorrosionsprodukte auf die Prozesse im Zementnahfeld** (z. B. Zementstabilität, Sorption, Porositätsänderungen und deren Einfluss auf die Gastransport-Fähigkeit sowie mikrobielle Aktivität) für Etappe 3 SGT vertieft zu untersuchen ist, insbesondere weil nicht nur in der Abfallgruppe 2 sondern auch in der Abfallgruppe 1 eisenreiche Abfallsorten enthalten sind» (ENSI 33/540, Seite 42, 2018).

3.2.14. «6 RD&D and technical activities in future stages of the disposal programme: With respect to gas production, the reference **corrosion rates will be continuously refined** in accordance with available experimental data and increased understanding of the evolution of conditions in the repository. The currently ongoing **corrosion experiments will be extended to further increase confidence in the reference corrosion rates**.

With respect to the buffer materials for HLW emplacement drifts, materials will be further evaluated to ensure that options are available that meet the requirements over the coming decades. The final materials will be selected in anticipation of the construction licence.

A recipe for cement-based backfill for L/ILW emplacement caverns will be developed for the general licence applications, although the possibilities of **using alternative materials will be continuously evaluated**; the final selection is expected to remain open until the construction licence application.

The decision regarding the material for the SF/HLW canisters will also be made in anticipation of the construction licence. Until then, steel and copper-coated canister options will be **continuously evaluated and developed** to a high level of technological readiness» (Nagra NTB 21-02, S. 131 – 135).

3.2.15. «8.4.5 Development of SF and HLW canisters: Development of an alternative canister concept: The long-term cooperation agreement with NWMO (Canada), initially established in 2013 to develop methods for **coating carbon-steel canisters with copper**, is ongoing. ... Based on the abovementioned activities, Nagra has developed a design for a copper-coated canister according to the Swiss disposal concept and waste inventory (Diomidis et al. 2017, Diomidis & King 2020).

Evaluation of further options: The most promising family of coating materials is **titanium alloys**, due to their extremely low corrosion rates, immunity to microbially induced corrosion and localised corrosion and the relative maturity of coating and cladding technologies. Their main shortcoming is hydrogen embrittlement, but this process is generally predictable and long canister lifetimes can be expected with confidence. Titanium alloy coating is currently

not being further developed for disposal canisters, as copper coating has emerged as the preferred option (Nagra NTB 21-02, S. 198).

3.2.16. «8.5.3.1 Corrosion of SF and HLW disposal canisters: Critical to the durability of copper coatings is the risk of galvanic coupling with the underlying steel substrate if a through-coating flaw exists. However, recent studies have shown that this is only possible in the presence of oxygen, and thus does not constitute a long-term risk in the repository (Standish et al. 2017, 2018). ... the corrosion of carbon steel in saturated anoxic bentonite has been addressed in benchtop studies (Smart et al. 2017a). ... A synthesis of the results obtained from these studies and their consequences for canister performance have been reported (Diomidis et al. 2021). ... Recent results from the FE-G experiment at Mont-Terri indicate that the aerobic period in the repository will be much shorter than initially thought (Giroud et al. 2018, Tomonaga et al. 2019)» (NTB 21-02, S. 224-225).

3.2.17. «8.5.3.2 L/ILW disposal containers, container backfill material and cement-based barriers: Internal degradation of cement and cement degradation due to groundwater ingress are well studied, and a degradation model is available (Berner et al. 2013, Kosakowski et al. 2014). Other well described reactions include corrosion, carbonation of cement due to CO₂ production from organic waste degradation and the alkali-silica reaction between silicate-rich aggregates and cement (Schwyn 2008, Cloet et al. 2014, Wieland et al. 2018, Kosakowski et al. 2020, Wieland & Kosakowski 2020).

The results revealed that the main factor controlling the extent of reactions (degradation of organics and release of CO₂ and CH₄, corrosion of metals resulting in H₂) is the availability of water and the pH-buffering capacity of the cement system due to the presence of portlandite or C-S-H with a Ca/Si ratio > 1.6. ... the porosity during the period of gas generation remains sufficiently high to ensure that gas release from the repository is maintained. These aspects will be documented in Nagra NTB 24-10 (planned) and its supporting documents» (NTB 21-02, S. 226).

3.2.18. «Da die Materialwahl nicht in naher Zukunft erfolgen wird, sollen bei der Entwicklung der Endlagerbehälter für BE/HAA mögliche Alternativen offenbleiben; hierbei liegt der Fokus der Arbeiten auf kupferbeschichteten Lagerbehältern» (Nagra 2016, Tab. A.3-3, Page A-26).

3.2.19. «Auflage 6.1 zur Langzeitstabilität von abgebrannten Brennelementen: ... Es kann indessen a priori nicht vollständig ausgeschlossen werden, dass durch eine Schädigung einzelner Hüllrohre eine Freisetzung von Radioaktivität aus dem Brennstoff oder allenfalls von Bestandteilen der Strukturmaterialien (sogenannter "Debris") in der Umladezelle der Brennelementverpackungsanlage erfolgt. ... Für die Langzeitsicherheit sind intakte Hüllrohre keine Voraussetzung; ihre Barrierenwirkung wurde in den bisherigen Langzeitsicherheitsanalysen nicht berücksichtigt (Kap. 3.1.2). Das Verhalten von Brennelementen während der Langzeittrockenlagerung ist Gegenstand eigener Untersuchungen, ... die Integrität während der Trockenlagerung für den weitaus grössten Teil der Hüllrohre gewährleistet ist, da z.B. wegen der Inertatmosphäre keine signifikanten Korrosionsprozesse erwartet werden und Sekundärschäden durch Hydrid-Reorientierung ohne Primärschäden ausgeschlossen werden können.

... keine signifikanten Schäden an Brennelementen durch Alterung und Trockenlagerung zu erwarten sind ...» (Nagra NTB 21-01, A.8.7).

⇒ Nagra NTB 21-02, FE TD 2022: «Die Beurteilung des Zustands und der Integrität der abgebrannten Brennelemente nach der Trockenlagerung ist vor allem für die Handhabung und die Auslegung der Verpackungsanlage relevant. Im Kontext mit zahlreichen internationalen Initiativen leistete die Nagra auch einen wichtigen Beitrag zu Untersuchungen an abgebrannten Brennstäben und Strukturmaterialien».

3.3. Bentonit

3.3.1. «Das Einbringen von Bentonit wird weiter optimiert und getestet (FE Experiment Felslabor Mont-Terri), um die notwendige Trockendichte zu erreichen» (Frage 50 TFS 2011 und Antwort Nagra + ENSI 2012).

Mikroorganismen in geologischen Tiefenlager (Frage 81 TFS 2012): «... Das Einbringen von Bentonit wird weiter optimiert und getestet (FE Experiment Felslabor MT), um die notwendige Trockendichte zu erreichen» (Frage 81 TFS 2012 und Antwort NAGRA 2014).

3.3.2. «Verhalten von Versiegelungsmaterial: «Spezielles Augenmerk zu richten auf: Bentonit im Kontakt mit Hoch-pH Wässern (Minimierung von Beton), wärmeproduzierende

Abfälle (Minimierung Temperaturmaxima)» (Frage 91 TFS 2012 und Antwort ENSI + Swisstopo 2014).

«Higher pH conditions are envisaged to be investigated in a later phase, in view of studying the behaviour of alkaliphilic microorganisms, which might be active in a real cement-dominated storage environment» (Projekt MTP BN 2017).

3.3.3. «Nachdem die Verfüllung eines modellhaften BE/HAA-Lagerstollens im 1:1-Massstab erfolgreich demonstriert worden ist (Full Emplacement-Experiment im Felslabor Mont-Terri, FE), sind im Hinblick auf die Einbringtechnik in naher Zukunft keine grösseren Aktivitäten vorgesehen» (Nagra 2016, Tab. A.3-3, Page A-26).

3.3.4. Suivi de l'expérience FE, « La Commission de suivi encourage Swisstopo à détailler les observations en relation avec le suivi des sondes et le mouvement de terrain (ordre de magnitude de mm) observés en relation avec le chauffage des colis. Le Canton souhaite qu'une évaluation annuelle de l'effet du chauffage sur les colis (éléments de chauffage) et les installations de suivi soit réalisée » (RCJU, Autorisation Phase 22).

3.3.5. «Die Wirksamkeit von Bentonit ist eingehend untersucht und charakterisiert worden (NAGRA Bericht 2016). Die verbleibenden RD&D-Aktivitäten beziehen sich auf spezifische Themen, wie die Fähigkeit, mikrobielles Wachstum bei bestimmten Quelldrücken zu unterbinden. Es sind Untersuchungen geplant, um in Zukunft das gegenwärtige Verständnis zur Wirksamkeit von Bentonit bei Temperaturen > 100°C weiter zu verbessern» (Nagra 2016, Tab. A.3-3, Page A-27).

- Cette affirmation est prématurée : de nombreuses questions restent ouvertes (FE-M TN2018-64 et FE-M TN2015 5-pager WP21).

⇒ Nagra 21.11.2019: «Die wissenschaftliche Grundlage erlaubt uns heute, unter Tiefenlagerbedingungen und Temperaturen bis etwa 150°C anzunehmen, dass der Bentonit seine sicherheitsrelevanten Eigenschaften beibehält. Weitere Anstrengungen sind im Gange, um die Grenzen des Systems bei höheren Temperaturen (> 150°C) auszuloten: HotBent, HiTec etc.».

3.3.6. «Differences in the relative humidity ... related to variations in the density of the bentonite ... for example due to the presence of wet spots (NTB 15-02, page 110-111).

The target dry density of 1.45 g/cm³ was exceeded in all cases, especially around the canister where a bulk dry density of approximately 1.525 g/cm³ was reached. However, there was some spatial variability in the emplaced GBM density. The dielectric profile measurements demonstrated that the emplaced density is highest near the augers, and there is a general trend of higher densities in the top part of the test tunnel compared to the bottom (Fig. 6-5). This was confirmed by the CPT profiles, which showed values for dry density between approximately 1.50 and 1.65 g/cm³, but, towards the tunnel invert, relatively low values of approximately 1.40 g/cm³ were measured» (NTB 15-02, page 71).

- Are the observed density differences of GBM correct in regard to the expectations formulated at the beginning (1.45 g/cm³)?

⇒ Nagra 21.11.2019: «Es ist zu erwarten, dass der Bentonit in Kontakt mit Porenwasser quellen wird. Im Nahfeld eines HAA Stollens wird Bentonit tendenziell vom äusseren Rand her aufgesättigt und dadurch den trockenen Bentonit von aussen nach innen kompaktieren. Denn dort wo der Bentonit quillt sinkt dessen Trockendichte. Sobald die Aufsättigung abgeschlossen ist, verschwinden aufgrund des Homogenisierungsprozesses die Dichtegradienten weitgehend».

3.3.7. Bentonite block: Numerous questions to optimize the bentonite blocks are formulated (NTB 15-02, page 133, Table 8-9).

3.3.8. Block wall: Moreover, there is currently no defined plan for testing of the block wall hydraulic or radionuclide retention function within the FE Experiment (NTB 15-02, pages 129-130).

- How should the retention functions for hydraulic or radionuclide be obtained (see the answer ENSI+Swisstopo 2014 to the question 91 TFS 2012)?

⇒ Nagra 21.11.2019 : «No retention functions for hydraulic or radionuclide need to be tested on the block wall as this is not relevant. We admit that this sentence is not formulated very clearly in the report and apologize for that.

The retention of radionuclides has been extensively demonstrated on small scale samples during the last decades by PSI and other recognized institutes. Furthermore,

the block wall has no role in radionuclide retention in the FE-experiment or in the repository.

The hydraulic properties of bentonite blocks and barriers has been demonstrated from the smallest scale to the largest 1:1 scale in numerous experiments (e.g. FEBEX at the GTS (18 years) by Nagra and also internationally).

3.3.9. «The attenuation of radionuclide release from the repository system is strongly dominated by sorption and diffusive transport in the clay-rich rock, which is much thicker than the bentonite engineered barrier. As a result, in a scenario in which diffusion dominates transport in the host rock, bentonite makes a limited contribution to retarding radionuclide transport, but nonetheless provides redundancy and a suitable chemical (low microbial activity) and hydromechanical (isotropic loads on the canister) environment» (NTB 15-02, page 2).

3.3.10. «E. 25: Die Nagra hat zementbasierte Verfüllkonzepte (inklusive deren Abbildung im Nahfeld-Modell, Auswirkungen auf die Bautechnik, Langzeitsicherheit und Einschränkungen der Stützmittel sowie Anforderungen an die Versiegelungsstrecken und geeignete Einbringungsmethoden) bis zum Standortvergleich vertieft zu untersuchen, um einen sicherheitstechnischen Vergleich mit bentonitbasierten Verfüllkonzepten für die Standortwahl zu ermöglichen» (NTB 16-02, Kapitel 7.4.2, 7.4.4.1, 7.4.4.2 und 7.5.3.3) (ENSI 33/593, 2018).

3.3.11. «8.4.4.1 Buffer material evaluation for HLW emplacement drifts: The buffer material MX-80 bentonite has been selected by various waste management organisations, and the status of characterisation is correspondingly advanced. It is recognised, nonetheless, that bentonites other than MX-80 that have similarly high montmorillonite contents can also be good candidates and might have advantages with respect to availability and cost. ...

As an alternative concept to using bentonite buffer, the use of a cement backfill as foreseen, Preliminary findings show that using a cement backfill does not result in a clear safety benefit compared with using bentonite. However, the cement backfill remains a potential alternative that might be further investigated in the future after the submission of the general licence applications.

... The evolution of the intergranular pore space of the granular bentonite during the re-saturation of the emplacement drifts is considered to be key for many different processes, such as gas transport, the evolution of microbiology and the iron-bentonite front, etc. ... Future activities will explore opportunities to optimise the granulometry of different bentonites to meet the post-closure safety requirements by a larger safety margin» (NTB 21-02, S. 192-194).

3.3.12. «8.5.3.3 Bentonite-based barriers (buffer, backfill, seals): In the current repository project, bentonite is used:

- in the form of compacted bentonite blocks and granular bentonite material as a buffer surrounding the SF and HLW canisters
- in the form of a sand/bentonite mixture in the Engineered Gas Transport System (EGTS) and
- in the form of granular bentonite material and/or blocks in other repository sealing and closure structures.

The HotBENT experiment at the Grimsel Test Site: ... In addition, the experimental design will allow investigation of the effects of high temperatures on corrosion, microbiological processes, ... Two types of bentonite are investigated (Wyoming and Czech-BCV). ... The HotBENT project is very similar to the Full-scale Emplacement (FE) experiment at the Mont-Terri Rock Laboratory (Müller et al. 2017), ...

The development of models and data used to evaluate radionuclide retention and transport in the bentonite buffer and other bentonite-based barriers in support of the safety assessment is discussed in Section 8.5.4. ... There is now ample evidence and acceptance of the fact that the bentonite buffer is an efficient hydraulic, mechanical and chemical barrier that will protect the canisters and attenuate the release of radionuclides. Sand-bentonite mixtures foreseen for the sealing and possibly for the backfilling elements as part of the closure concept of the repository have been thoroughly characterised in Manca (2016). Such sand-bentonite mixtures are discussed in conjunction with gas transport in an L/ILW repository (see insert in Section 8.5.2.2).

Processes during saturation (focus on the HLW repository): ... the capability of these models to **predict mechanical behaviour is less advanced**, ...

Gas transport – At the onset of saturation, the partly saturated buffer contains large amounts of air. Many laboratory-scale and large-scale experiments have shown that the increasing pressure of the gas in the saturating buffer leads to **dissolution of the gas in the infiltrating porewater** (Romero & Gonzalez-Blanco 2019).

Chemical and mineralogical evolution: ... The thermal gradients will induce a limited redistribution of accessory minerals, including dissolution of gypsum on the "cold" side and **reprecipitation** of anhydrite/gypsum on the "hot" side (Hadi et al. 2017).

Microbial activity: ... The main concern is the possibility that microbial sulphate reduction could produce gaseous H₂S, which could diffuse towards the canister. Bounding analyses show, however, that the **host rock does not provide enough sulphate for this process to be safety-relevant** (Jenni et al. 2017, Cloet et al. 2017). Enhanced hydrogen consumption by microbial activity in sand/bentonite mixtures as a way of mitigating gas pressure build-up is being investigated as an optimisation measure in the MA-A (Platform Microbial Studies) experiment in the Mont-Terri Rock Laboratory.

Processes after saturation: Once **saturation** is complete (after about 100 – **200 years**) ...

Gas transport: If constant gas production rates are assumed, the release of hydrogen from steel corrosion may not be fully compensated by dissolution and diffusion through the buffer.

A separate gas phase will form and, when the pressure is close to the confining pressure, gas pathways will also form, the nature of which is not fully understood. However, it appears now that when more realistic gas production rates are assumed, a **gas phase is not expected to form from the anaerobic corrosion of canisters** in the long term (Leupin et al. 2021).

Iron-bentonite interaction: The aerobic phase of the repository will only last for a short period of time, according to recent evidence from large-scale, in-situ experiments. Anaerobic corrosion of steel then follows, which will **consume water and produce hydrogen gas**.

Microbial processes: The compacted saturated bentonite, with its high swelling pressure and nanoporous structure, provides a hostile environment for microbes. Thus, at high densities, all **microbial activity comes to a halt** (Smart et al. 2017a).

Planned RD&D in the next five to ten years: Gas transport: Nagra's participation in the EURAD GAS work package will allow it to **develop arguments that gas transport through the HLW nearfield (including the EDZ) does not impair the safety-relevant properties of bentonite**» (NTB 21-02, S. 227-231).

4. 4. Bautechnik

4.1. Konzept

4.1.1. «Bei den Untertagebauten ist im Hinblick auf die minimale Schädigung des Wirtgesteins u.a. Folgendes zu beachten: Querschnitte und Länge der Lagerstollen bzw. Kavernen sollen nach den Erfordernissen der Langzeitsicherheit gewählt werden» (KNS 2010, S. 45).

4.1.2. «Die untertägigen Erschliessungsbauten sollen so konzipiert werden, dass die Wege im Wirtgestein möglichst kurz sind» (KNS 2010, S. 45).

4.1.3. «Die Bautechnik betreffen die Forschungsbereiche 7.4.1 (Generic design concept) und 7.4.3 (Tunnel construction concepts). Hier macht sich einmal mehr das Fehlen eines Referenzprojekts nachteilig bemerkbar. Die früher aufgedeckten Mängel in NAB 14-81, NAB 16-45 und NAB 16-46 (vgl. AG SiKa/KES 2016) finden sich unverändert im Bericht NTB 16-02 wieder. Man denke nur an die Zwischensiegel und die Machbarkeit der Anlage. Jene hat die Nagra bereits aufgegeben, diese wird seit dem Entsorgungsnachweis nicht mehr in Frage gestellt» (AG SIKa/KES 2019, S. 10).

4.1.4. «Zum Zeitpunkt der Rahmenbewilligung werden im Hinblick auf eine spätere Optimierung im Rahmen des mehrstufigen Bewilligungsverfahrens für die Lagerauslegung noch **verschiedene Varianten offengehalten** (Nagra NTB 16-01, Seite 85, Anhang A.2).

- Varianten hinsichtlich Materialien und Auslegungskonzepte für die BE/HAA-Endlagerbehälter;
- Varianten für die Auslegung der Tunnel inclusive Ausbruchsicherung, Verkleidung und Wahl des Abdichtungssystems».

4.1.5. «Experiments for Characterization of changes in the rock, induced by gallery excavations, heat of waste and cements» (WP 23, Table 3, 2017).

4.1.6. RCJU, exemple Autorisation Phase 11 (et autres), Suivi géotechnique dans le laboratoire (cf. 2c) : « Les conditions de sécurité dans le laboratoire doivent faire l'objet d'une surveillance géotechnique régulière. L'OFEG (aujourd'hui OFEV) doit remettre à la Commission de suivi le relevé annuel détaillé des fissures dans le laboratoire ainsi qu'un concept de surveillance géotechnique. Ce concept de surveillance sera à appliquer pendant la phase 11. Le suivi géotechnique doit être assuré pour toutes les phases ultérieures. Les mesures sont à documenter (cf. 2c) ».

4.1.7. « Suivi de la stabilité globale d'une construction dans une formation argileuse : Le creusement de la nouvelle galerie a des conséquences sur les eaux-porales qui coulent de nouveau ainsi que sur l'ensemble de la stabilité des anciennes galeries. Le creusement est donc une intervention de poids. Si l'on considère l'exécution du dépôt final, il y aura des phases de construction qui alterneront avec des phases de stockage. **Toute nouvelle construction aura donc des effets sur le dépôt dans son ensemble.** Le rapport de conservation d'ouvrage doit faire état des changements. Il est nécessaire d'équiper les nouvelles galeries des mêmes systèmes de mensuration et de faire le suivi des mouvements du labo dans son ensemble » (Buser, Mail 17.1.2019).

«Der Hinweis des ENSI in [ENSI 33/939] zur vertieften Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen Ausbau und Gebirge ist grundsätzlich zu unterstützen. Allgemeiner gefasst erwartet die KNS, dass diese Wechselwirkungen im weiteren Verfahrensablauf stufengerecht untersucht und analysiert werden» (KNS 2023).

« Lors de l'agrandissement du laboratoire en 2008 (Galerie 08), des écoulements d'eau interstitielle sont apparus, ce qui suggère une réaction directe de la roche au forage réalisé à l'aide de tunneliers. Ces phénomènes se sont répétés lors de la construction de la nouvelle galerie à partir de 2018. Il s'agit là d'une observation très importante, car la construction d'un dépôt en couches géologiques profondes nécessitera une alternance de phases de construction et de stockage. » (Buser, Actes 2020 de la Société jurassienne d'Émulation).

Des infiltrations d'eau très importantes ont aussi été constatées dans la galerie de fuite après les pluies importantes de l'été 2021 (voir photo ci-après ; "HS" n'est pas correct, car la photo est prise côté sud de l'accès au LMT ; Field Report 21_07_02) :



Figure 2: HS: Significant water inflow into the Safety Gallery at the base of the St-Ursanne Formation (Photo: S. Schefer, swisstopo).

4.2. Versiegelung

4.2.1. «Verhalten von Versiegelungsmaterial (Frage 91 TFS 2012). «Es gilt zum Beispiel, die wärmeproduzierenden Abfälle bzw. die Kanister in einem Tiefenlager so anzuordnen, dass keine zu hohen langandauernden Temperaturen die Bentonitbarriere schädigen können. Ferner soll in einem Tiefenlager für hochaktive Abfälle die Verwendung von Beton optimiert bzw. die Betonverkleidung in den Einlagerungsstollen minimiert werden. Abschliessend lässt sich sagen, dass Bentonit eine **hochwirksame robuste** Barriere in geologischen Tiefenlagern zur Rückhaltung von Radionukliden bildet» (Antwort ENSI + Swisstopo 2014).

4.2.2. «Die AG SiKa/KES empfiehlt, die Versiegelungstechnik intensiver als geplant zu erproben und zu entwickeln. Deren Funktionstüchtigkeit sollte nicht erst in den Testbereichen

(S. 76), sondern vorher schon nachgewiesen werden – beispielsweise im Forschungslabor Mont-Terri» (AG SIKA/KES 2019, S. 6; KNS 2018, Empfehlung 3, S. 30).

4.2.3. «Nachdem die Verfüllung eines modellhaften BE/HAA-Lagerstollens im 1:1-Massstab **erfolgreich** demonstriert worden ist (Full Emplacement-Experiment im Felslabor Mont-Terri, FE), sind im Hinblick auf die Einbringtechnik **in naher Zukunft keine grösseren Aktivitäten vorgesehen**» (Nagra 2016 NTB 16-01).

- Cette affirmation est prématurée : Les difficultés rencontrées lors de la mise en place du chauffeur H3 (voir FE-C 2012 WP18 et FE-D TN2015-07) montrent qu'il serait pertinent de réaliser une niche réellement à l'échelle du concept prévu avec la mise en place de colis de dimension et de poids similaires aux colis radioactifs prévus en tenant compte de la radiation.

⇒ Nagra 21.11.2019 : « Les difficultés rencontrées lors de la mise en place du corps de chauffe numéro 3 sont souvent sorties de leur contexte. En effet, la mise en place des corps dans le contexte de l'expérience FE n'ont **jamais prétendu répliquer la mise en place de coli**. Dans ce sens, la mise en place de coli n'est pas comprise dans l'analyse TRL (NTB 15-02, section 8). La Nagra prévoit des **tests et le développement technologique** nécessaire dans les décennies à venir ».

4.2.4. «Die zementbasierte Verfüllung der SMA-Lagerkavernen muss so ausgestaltet werden, dass sie die Anforderungen an die Langzeitsicherheit erfüllt (Rückhaltung der Radionuklide und Gasspeicherkapazität). Der Schwerpunkt der Arbeiten liegt auf der Auswahl der Zuschlagstoffe und der bautechnischen Eigenschaften der gewählten Zementrezepturen».

«Für die Versiegelung und den Verschluss des Tiefenlagers werden Varianten untersucht, die hinsichtlich der Anforderungen aus Sicht Langzeitsicherheit und aus Sicht Umsetzung optimiert sind. Unterstützt wird dies durch internationale Verschluss- und Versiegelungsdemonstrationen sowie durch den Grossversuch im Massstab 1:1 zur Demonstration der gasdurchlässigen Stollenversiegelung im Felslabor Grimsel und die dazugehörigen Laborexperimente» (Nagra NTB 21-02, XI).

4.2.5. «Hervorgehoben werden können aus Sicht der KNS der Hinweis, ... die Entwicklung bezüglich des Einsatzes des Bindemittels Portlandzement in der Zementindustrie zu verfolgen und rechtzeitig zu reagieren, falls andere Materialien bzw. Betongemische zum Einsatz kommen könnten. Ergänzend merkt die KNS an, dass im Felslabor Mont Terri bereits Experimente durchgeführt werden, welche das Langzeitverhalten des Opalinustons und die Thematik von Fluid-Migration durch Diskontinuitäten adressieren. In diesem Zusammenhang wäre von Interesse, wie die vom ENSI empfohlenen Untersuchungen in den Rahmen der aktuellen Forschungsarbeiten im Mont Terri Projekt einzuordnen sind und ob hier gegebenenfalls Synergien genutzt werden könnten» (KNS 2023, S. 29).

4.3. Support

4.3.1. «The actual tunnel **support types in the sealing section may not be adequate** to allow a reliable ground control» (Expertenbericht zu Etappe 2, Ingenieurgeologie ETHZ 2015. See also 6.1.3).

⇒ NTB 21-02, S. 190, 192: «8.4.3 Tunnel construction concepts and technology for the support of SF/HLW emplacement drifts. URL experience: Further observations of the weathering process in the section with the steel set support **will give** indications of its integrity over time. The applied monitoring methods have performed well so far. However, the interpretation of the circumferential strain measurements within the shotcrete lining using fibre optics is demanding due to time-dependent effects occurring within the recently emplaced shotcrete.

Tunnel construction: Observation of the development of strains and deformations in the TS experiment **at the Mont-Terri URL will continue**. Further, degradation of the exposed rock in Section 2 of the TS experiment will continue to be monitored photogrammetrically **to demonstrate the suitability of a rock support relying only on steel sets for sealing sections**».

5. 5. Mikrobiologie

5.1. Mikrobiologische Aktivität

5.1.1. «Ein **wichtiges Kriterium** ist die Unterdrückung **mikrobiologischer Aktivität** an der Behälteroberfläche. Mikrobiologische Aktivität kann die Lebensdauer des Behälters

verkürzen. Beim eventuellen Einsatz von mit Kupfer beschichteten Behältern könnte diese Kupferbeschichtung durch Sulfat-reduzierende Mikroben (Sulfid-Bildung) beschädigt/korrodiert werden, obwohl Sulfat nur in beschränkter Menge zur Verfügung steht (Diffusions-kontrollierte Nachlieferung). ... Bei der Verwendung von Stahlbehältern ist einzig die durch Mikroben beschleunigte Korrosion und die damit verbundene Verkürzung der Lebensdauer negativ zu bewerten. Eine etwas verkürzte Lebensdauer würde aber die Langzeitsicherheit eines Tiefenlagers nicht in Frage stellen, wie entsprechende **Dosisberechnungen** zeigen» (Frage 50 TFS 2011 und Antwort Nagra + ENSI 2012; Frage 81 TFS 2012 und Antwort Nagra 2014).

5.1.2. «Our results indicate that H₂ consumption by pyrite reduction to pyrrhotite is not a relevant process since it results in very limited H₂ consumption. In contrast, sulphate reduction by microbial activity may be regarded as a potentially relevant consumer of H₂. ... Our results indicate that H₂ could be significantly consumed by bacterial activity (as shown in Figure 32), provided the environmental conditions are favorable to maintain the reaction over time. However, **more studies are needed** to well establish the real impact of H₂ consumption by microbes upscaled to the repository conditions» (Amphos21, 2015).

5.1.3. «**Der Einfluss von Mikroorganismen** unter Tiefenlagerrelevanten Bedingungen **soll vertieft beurteilt werden**» (Nagra 2016, Tab. 3-3 Seite A-24).

5.1.4. «Der Einfluss der Auflockerungszone als bevorzugter Mikrobiologische Untersuchungen in den ausgewählten Verfüllmaterialien (und möglicherweise auch in der Auflockerungszone) deuten auf eine **mikrobielle Aktivität** hin. Diese kann, wenn sie nachweislich zur Verringerung der Gasbildung beiträgt, möglicherweise optimiert werden». «Les études microbiennes suggèrent que l'EDZ (et les matériaux de remblayage sélectionnés) sont susceptibles d'héberger une activité microbienne qui, s'il peut être démontré qu'elle a des impacts bénéfiques sur la réduction des gaz, peut potentiellement être optimisée (Nagra NTB 21-02, S. 17/25) ».

5.2. Mikrobiologische Gasentwicklung

5.2.1. NTB 21-02: «**Gas consumption** by bacteria: the MA-A experiment at the Mont-Terri Rock Laboratory (Burzan 2021): The MA-A experiment was initiated to test the hypothesis that subsurface microbes, if well characterised, can be beneficial for the performance of the repository. The ultimate goal of this experiment is the development of the scientific basis to design a repository that takes into account the presence and activity of microbes. Anaerobic steel corrosion of waste and waste canisters will lead to a build-up of hydrogen gas. To avoid any potential losses of the integrity of the host rock, strategies to mitigate the risks arising from gas pressure build-up are under investigation. ... Thus, microbial growth within a porous matrix in the backfill material could be envisioned as an additional safety aspect, via the net decrease in gas pressure within the repository. ... the potential of hydrogen-oxidising bacterial colonies, carrying out both sulphate reduction and methanogenesis.

Additionally, methane was detected in the gas phase, suggesting the activity of methanogenic archaea. ... Thus, stimulating the growth of microbes in the right location can contribute to a reduction in gas pressure. ... Transport calculations (Leupin et al. 2016c) suggest that **sulphate diffusion is the limiting factor for the consumption of repository-generated gases**. The MA-A experiment (Fig. 8-19), however, shows that, **when sulphate becomes limiting, hydrogen gas is readily converted to methane**. Methanogenesis was only observed in a sand/bentonite matrix. ... An important finding was that sulphate-reducing bacteria occur adjacent to methanogens.

Microbial processes: Several initiatives have been launched to better understand the factors determining the bentonite material densities that can limit microbial activity. The expected out- come is that a great variety of available bentonite materials can be optimised **to reduce the likelihood of microorganisms thriving in pure bentonite environments**. ... 8.5.3.5 Chemical interactions at cement – clay interfaces and in the EDZ: Other phenomena ... are related to microbial activity in the EDZ, where it has been suggested that microbes may consume hydrogen and reduce sulphate to sulphide. Regarding microbial activity, significant progress has been made as a result of several experiments at the Mont-Terri Rock Laboratory (e.g. MA and MA-A (Microbial Activity): Leupin et al. 2017a, PC (Porewater Chemistry): Wersin et al. 2011, HT (Hydrogen Transfer): Vinsot et al. 2014) and an extensive research programme at EPFL, as well as the Euratom MIND (Microbiology in Nuclear Waste Disposal) project ...

Sulphate-reducing bacteria have been recognised as an important type of microorganism that can consume H₂ if enough sulphate is present (Daumas et al. 2014), thus providing a potential sink for repository-generated gas. ... As Opalinus Clay porewater contains sulphate that can be reduced to sulphide by microorganisms (Leupin et al. 2017a), any adverse consequences must be assessed. The bentonite buffer around the canister, when emplaced at sufficiently high density, is characterised by its small pore size and significant swelling pressure when saturated. These conditions limit the likelihood of microbial activity in the buffer and at the canister surface but might not fully exclude it in the EDZ. Sulphide produced in the EDZ may diffuse into the bentonite and potentially increase canister corrosion rates. However, as the fractures that comprise the EDZ have a tendency to close over time (Section 8.2.2.5), these reactions are thought to be limited both in space and in time.

Finally, an enhanced assessment of the porewater evolution in Opalinus Clay and in buffer and backfill materials, taking into account changing redox conditions resulting from waste interactions and the microbial alteration of hydrogen and methane, will be conducted (Cloet et al. 2017)» (NTB 21-02, S. 232-237).

5.2.2. FE-M Experiment; Minutes (TD 20220128, S. 12)

- The microbiological experiments should be extended on DNA (or mcrA) analysis to assess the presence of native or exogen microorganisms in porewater (contamination through mining). It should be considered to use also porewater samples from other experiments (HT, ...).

⇒ Comments: that the analysis of DNA prints would be useful, not only of FE samples but also of other experiments. What are the main aspects to assess microbial activity?

Stopelli: no water samples so far, mainly gas because water is just condensed vapour. Thus, we basically rely on isotopes to address microbiological reactions. In the future, the modelling of gas will be more important, e.g., of gas generated by OPA. If this can be explained by raw diffusion, then microbial activity can be ruled out. Also, the comparison with other experiments, e.g., HotBENT in the absence of OPA host rock effects, could give some information. At the moment, no strong evidence of microbial activities during the stabilised heating phase.

Leupin: we will always have microbes in there. The question is whether or not they are relevant to safety. Having methane does mean nothing. EDZ contains microbes in its high secondary porosity until it self-seals.

Stopelli: the microbes may even be an asset to safety.

Guillemot: thermogenic and biogenic fingerprints are typical of OPA-methane.

6. 6. Mobilität

6.1. Radionuklide

6.1.1. «Alle bisherigen und aktuellen ... Diffusionsexperimente (DR, DR-A) sind in der tonigen Fazies durchgeführt worden. Zukünftige Nachfolgeexperimente sollten die sandige Fazies berücksichtigen» (Landestopographie 2014).

6.1.2. «Numerical modelling to predict the dimensions of the EDZ, to determine the hydraulic conductivity, and to understand the change in the conductivity with time were conducted by Nagra. ... A number of assumptions and limitations (many not fully discussed) in the numerical approach for the long term EDZ behavior render the results unreliable for predictions or safety analyses. In particular, the modelled fracture density is significantly over-estimated (in comparison to in-situ observations or measurements at Mont-Terri), potential influencing factors on the EDZ properties derived from the Y-Geo code are not discussed and are not reproducible for evaluation, and the relationship between effective stress and fracture aperture (rock mass swelling mechanism) with time is questionable» (ETHZ 2015, Ingenieurgeologie, Expertenbericht zu Etappe 2).

6.1.3. «The effect of the EDZ on long term safety has also been modelled and assessed by Nagra based on pipe-flow and radionuclide transport models. Model assumptions are in general agreement with experimental results. These calculations show that the EDZ around backfilled tunnels only provides a significant radionuclide transport path if the hydraulic conductance does exceed 10⁻⁷ m³/s (corresponding to a hydraulic conductivity of 10⁻⁸ m/s and a flow cross-sectional area of about 10 m²). These results show that tunnel support systems which allow reliable ground control and EDZ self-sealing are of foremost relevance for the long-term safety, in particular in the sealing sections. Of particular relevance are

tunnel support measures, which allow to reliably control tunnel overbreak and induce damage, or measures, which enable effective back-filling. The actual tunnel support types in the sealing section may not be adequate to allow a reliable ground control» (Expertenbericht zu Etappe 2, Ingenieurgeologie ETHZ 2015, see 4.3.).

6.1.4. «The results from laboratory experiments and in-situ experiments support the hypothesis of self-sealing in a moderately damaged EDZ in Opalinus Clay. ... While the impacts of a moderately damaged EDZ on long-term safety have been studied by several experiments, the effects of large overbreak on long-term safety have not been systematically explored» (Expertenbericht zu Etappe 2, Ingenieurgeologie ETHZ 2015).

6.1.5. «The influence of the EDZ on the long-term safety has been assessed by Nagra based on experimental results and radionuclide transport models. The important self-sealing assumptions of these radionuclide transport models are supported by experimental observations, but not by the new numerical models presented by Nagra. Effective self-sealing mechanisms have mainly been shown to work for weekly to moderately damaged rock masses in the EDZ, but not for larger overbreak» (Expertenbericht zu Etappe 2, Ingenieurgeologie ETHZ 2015).

«Auswirkungen der Auflockerungszone auf die Langzeitsicherheit werden im Rahmen von experimentellen Befunden bewertet und mittels Radionuklid-Ausbreitungsrechnungen modelliert. Nach Ansicht der Prüfexperten werden die diesen Ausbreitungsrechnungen zugrunde liegenden wichtigen Annahmen zur Selbstabdichtung durch die bisherigen experimentellen Befunde, nicht aber wesentlich durch die neuen Modellrechnungen gestützt. Die experimentellen Befunde zur Selbstabdichtung beziehen sich nur auf gering bis moderat gestörte Auflockerungszonen, aber nicht auf grössere Ausbrüche» (Expertenbericht zu Etappe 2, Ingenieurgeologie ETHZ 2015).

6.1.6. «Um die Bedeutung der Auflockerungszone (AUZ) für die Langzeitsicherheit weiter zu untersuchen, werden AUZ-relevante Daten aus dem Felslabor Mont-Terri und anderen Forschungslabors kompiliert» (Nagra 2016, Tab. 3-3 Seite A-27).

6.1.7. «8.5.3.4 EDZ and the mechanical evolution of the surrounding Opalinus Clay: The excavation of tunnels and drifts in the host rock leads to stress redistribution that results in micro- and macro-scale fractures within an excavation damaged zone (EDZ). The EDZ develops during the construction of the tunnels and consolidates after the emplacement of the tunnel support. The formation and evolution of the EDZ alters safety-relevant properties of the host rock adjacent to the emplacement rooms, sealing zones and other underground structures. It can result in an increased porosity and in the creation of new or the reactivation of old fractures, thus potentially leading to higher hydraulic conductivity, gas permeability and thermal conductivity. ... This is particularly relevant since the EDZ around backfilled underground structures can be a potential release path for radionuclides as well as a possible pathway for corrosion- and degradation-generated gases. ... In this context, a performance target (referred to as safety function indicator criteria in Leupin et al. (2016a, 2016b) has been developed that the axial flow rate of water in the EDZ around the SF and HLW emplacement drifts and along the EDZ around the backfilled and sealed access routes should remain below $10^{-8} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Note that no such target is set for the EDZ around the L/ILW emplacement caverns due to the fact that the hydraulic conductivity of the interior of the emplacement caverns is already rather high ($\sim 10^{-6} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). There are also requirements concerning the potential impact of the EDZ on the barriers provided by the bentonite buffer and host rock (Leupin et al. 2016a, 2016b). These requirements and targets will be reassessed for the safety case and will be reported in Nagra NTB 24-10 (planned) and its supporting documents» (NTB 21-02, S. 234).

6.1.8. «Von besonderer Bedeutung sind Modelle zur Diffusion von Radionukliden (Van Loon 2014, Gimmi & Kosakowski 2011) sowie zur Sorption von Radionukliden auf Ton- und Zementmineralen (Baeyens et al. 2014, Wieland 2014)» (Nagra 2016, Seite 39).

6.1.9. «Die Thematik des Radionuklidtransports weist einen fortgeschrittenen Bearbeitungsstand auf und wird in Zukunft punktuell weiter verfeinert» (Nagra 2016, Tab.3-3 Seite A-24).

6.1.10. «Der Einfluss der Auflockerungszone als bevorzugter Fliesspfad für Radionuklide erwies sich im verwendeten Blindstollenkonzept für die HAA-Lagerstollen als **minima**». «Il a été démontré que le rôle de l'EDZ en tant que cheminement préférentiel pour les

radionucléides était **minime** dans un concept prévoyant le stockage des DHA dans un tunnel en cul-de-sac » (Nagra NTB 21-02, S. XII/XX).

S. 93: Radionuclide migration (HLW repository only): Based on the Mont-Terri experience, these experiments require a timeframe of around five years, after which **overcoring** is carried out to obtain the results.

S. 152: 8.2.2.1. Radionuclide transport: Suitable **modelling** approaches and robust datasets of transport and retention properties **with uncertainty bands are needed**. ... The confining units with lower clay mineral content, in contrast, contain **discrete transmissive features** where advective/ dispersive flow govern transport.

... The upscaling of diffusion processes for iodide is currently being studied in the Hydrogeochemistry and Transport Mechanisms (DR-B) experiment at the Mont-Terri Rock Laboratory, which was started in 2016 and will continue over the next few years.

... Prior to SGT Stage 3, the competition of radionuclides and stable elements for sorption sites was considered in the safety analysis in a **simplified** way. ... Chemically similar elements (valence state, hydrolysis behaviour) have been shown to sorb on the same set of strong sites and exhibit sorption competition.

... The behaviour of low molecular weight organic compounds in the host rock was studied to assess their impact on ^{14}C transport in the geosphere and the implications for dose calculations (Chen et al. 2018b, 2018c). A **weak retardation** of the organic compounds was observed.

S. 155: ... The concepts considered transport dominated by diffusion in the Opalinus Clay matrix, **assuming the absence of relevant advective flow along fractures**, ...

S. 173: 8.3.3. Waste characteristics: The properties of greatest importance in safety assessment are the **release rate of radionuclides and the gas generation rate** under disposal conditions, as well as the confirmation that wastes will neither exceed criticality requirements in waste handling operations nor under long-term disposal conditions. In relation to radionuclide release, experience from previous safety analyses (Nagra 2002a, 2014b) shows that improving the understanding of the radionuclide release from spent fuel, as well as reducing uncertainties in the release rate of ^{14}C from L/ILW, are of greatest importance. In contrast, while uncertainties associated with long-term HLW glass dissolution remain, the significance of these uncertainties for the post-closure safety assessment has been shown to be low (Nagra 2002a). **Even if radionuclides other than ^{14}C are released from L/ILW, there is little benefit in further improving understanding as the consequences are acceptably low, even with the basic assumption in release models that all nuclides are released from the waste within 100 years after being placed in the repository.**

S. 174: 8.3.3.1. ... dissolution and release of radionuclides

1. Release of activation products from Zircaloy and other metal parts of the fuel assemblies, ..

2. Release of the IRF from the spent fuel assemblies, which mainly represents the fraction of the total inventory of certain radionuclides (e.g. ^{135}Cs , ^{129}I and ^{36}Cl) in the fuel that is released from the gap (the interconnected void space in the fuel rod). Release from this gap is analogous to fission gas release (FGR) in that the released radionuclides are present in the gap at the end of fuel irradiation in the reactor. In safety assessment, the IRF can be in the order of 10% for ^{135}Cs , ^{129}I and ^{36}Cl , which are highly soluble elements, and is assumed to dissolve instantaneously when a canister is eventually breached and water penetrates into it. Some other long-lived fission products that are commonly found at grain boundaries in the fuel (e.g. ^{99}Tc) are often included in the IRF, but are insoluble under the reducing conditions of repository groundwater.

S. 175: **Fission gas release from spent fuel is known to correlate with the IRF** of some radionuclides (Johnson et al. 2012) ..., these data have provided the basis for a radionuclide release model for spent fuel reported in Johnson (2014).

S. 176: 8.3.3.4. ^{14}C in L/ILW: ^{14}C in metallic radioactive waste is produced predominantly by the thermal neutron activation of precursor species, mainly nitrogen, present in nuclear fuel components and reactor core structures. In Swiss L/ILW, the ^{14}C inventory is mainly associated with irradiated steel and, to a lesser degree, with Zircaloys and organic sources. ^{14}C can be released in a variety of chemical forms, both organic and inorganic, as a result of dissolution or waste degradation processes. ... In the context of the long-term release of ^{14}C under repository-relevant conditions, ^{14}C speciation is expected to shift to reduced

compounds, such as gaseous hydrocarbons like methane, as local conditions become reducing due to, e.g., the generation of H₂ from corrosion and the decrease in the generation of oxidant species by radiolysis.

S. 179: Safety assessments for clay disposal systems as part of the CAST project showed that these systems have an excellent performance regarding ¹⁴C because transport times typically greatly exceed the half-life of ¹⁴C, especially in the clay host rock (Henocq et al. 2018). The impact of organic ¹⁴C could become more relevant if there were scenarios in which radionuclide transport through the geological barrier is relatively fast. In such scenarios, the impact of organic ¹⁴C on the dose is highly dependent on the corrosion rates, amount of metals and their specific surfaces (Capouet et al. 2018). ... Nagra will contribute further to the long-term corrosion experiment ... which will continue at PSI until at least 2023. The results of the Euratom CAST project, as well as other progress made internationally, will be reviewed in detail with a view to incorporating relevant information on ¹⁴C behaviour, e.g. ¹⁴C release rates, instant release fractions, ¹⁴C speciation and retention (see Sections 8.2.2.1 and 8.5.4) over long timescales into future safety assessments» (NTB 21-02).

6.1.11. «Die verfügbaren Daten hinsichtlich des Transports von Radionukliden im Nahfeld, des bestehenden Prozessverständnisses sowie des Kenntnisstands von kompaktierten Tonsystemen sind ausgereift. Die verbleibenden Ungewissheiten beschränken sich auf die Übertragbarkeit von den in dispergierten Tonsystemen gemessenen Daten auf kompaktierte Systeme. Ebenso sind Aspekte der Sorption, Radionuklidspeziation, das Verhalten redoxsensitiver Radionuklide und die Speziation, Stabilität und Rückhaltung von ¹⁴C zu beachten» (Nagra 2016, Tab.3-3 Seite A-27).

6.1.12. Uni Bern 2021: Carbon-14 release and speciation during corrosion of irradiated steel under radioactive waste disposal conditions <https://boris.unibe.ch/164498/>

6.1.13. «E.12: Das ENSI empfiehlt für das Rahmenbewilligungsgesuch, dass sicherheitsrelevante THMC-Aspekte im Sicherheitsbericht gebührend berücksichtigt werden. Dabei sollte unter anderem auf die erzielten Fortschritte hinsichtlich der modellbasierten Vorhersage der Entwicklung des Nahfelds im Vergleich zu den experimentellen Daten eingegangen werden sowie die Auswirkungen auf den Radionuklidtransport berücksichtigt werden (Kapitel 7.5.2.1 und Kapitel 7.6.1, NTB 16-02) (ENSI 33/593, 2018).

8.5.4 Radionuclide transport in clay- and cement-based backfills: Diffusion and sorption are the dominant processes governing radionuclide transport and retention in clay systems (see Sections 6.2.3 and 8.2.2.1 for more details). ... Glaus et al. (2017) provided a summary of the experimental results obtained from various diffusion experiments with positively and negatively charged radiotracers in compacted Na-montmorillonite and in a natural bentonite,

...

The PSI/Nagra thermodynamic database is currently being updated to ensure it is state of the art for all radionuclides to be considered in the safety assessment in SGT Stage 3 and will be published soon. The solubility limit database for compacted bentonite systems from SGT Stage 2 (Berner 2014) will be updated by 2023» (NTB 21-02, S. 238-240).

6.1.14. Szidat et al., 17.12.2021 ("C¹⁴ from Steel 2021.docx"): Carbon-14 is a key radionuclide in the safety assessment of deep geological repositories (DGR) for low- and intermediate-level radioactive waste (L/ILW). Irradiated metallic wastes generated during the decommissioning of nuclear power plants are an important source of ¹⁴C after their disposal in deep geological repositories (DGR). ... In a DGR, the release of ¹⁴C will be mainly in gaseous form and migrate via the gas pathway from the repository near field to the surrounding host rock and eventually to the environment.

6.2. Gase

6.2.1. «Organische Stoffe sollen nach Möglichkeit in eine Form gebracht werden, die unter den im Tiefenlager gegebenen Bedingungen inert ist. Dies gilt sowohl für die noch zu konditionierenden Abfälle als auch für die bereits bestehenden Abfallgebände» (KNS 2010, S. 45).

6.2.2. «Stützmittel sollen vor dem Verfüllen der Untertagebauten entfernt werden, wenn sie wesentlich zur Gasentwicklung beitragen oder die Barrierenwirksamkeit des Wirtgesteins in anderer Weise gefährden können» (KNS 2010, S. 45).

6.2.3. «Hinsichtlich der Lagerbedingten Einflüsse hat die KNS insbesondere die Bedeutung der Gasbildung hervorgehoben. Ein wichtiger Aspekt betrifft in diesem Zusammenhang die

Verwendung von **alternativen Behältermaterialien** für die HAA/BE-Lagerbehälter. Die KNS hat ein entsprechendes Forschungsprojekt initiiert. Es ist wichtig, dass dieses Projekt mit Priorität realisiert wird» (KNS 2011, S. 21).

6.2.4. «Für den Opalinuston wäre insbesondere zu zeigen, für welche Sättigungen mit frei fließenden Gas- und Wasserphasen gerechnet werden kann und wie der Übergang von der Kavernenverfüllung in den Opalinuston erfolgt, insbesondere bezüglich der Druck- und Sättigungsverhältnisse vor Beginn der (weiteren) Entsättigung des Opalinustons. ... Dies sind u.a. und ohne besondere Reihenfolge (Emch & Berger 2009 in Giamboni 2017):

- Einfluss der Porenraumstruktur auf den Gastransport
- Klinkenbergeffekt
- Vorgang und Bedingungen des Gaseintritts ...»

6.2.5. «Ähnlich stellt sich die Situation bei den beiden letzten Transportmechanismen dar: viele Fragen zum Gültigkeitsbereich des dilatanzgesteuerter Gasflusses sind offen, und selbst bei Horseman finden sich unterschiedliche Aussagen» (z.B. Horseman 1999 vs. 1996; Emch & Berger 2009 in Giamboni 2017).

6.2.6. «Gasexperimente mit verschiedenen Gasen (u.a. auch Wasserstoff) und **alternativen Behältermaterialien** sind im Feld (z.B. Mont-Terri Felslabor) zu vertiefen, vor allem auch in **anderen Faziestypen (z.B. sandige Fazies)** und mit anderen Versuchsanordnungen (z.B. Richtungsabhängigkeit). Mit ersten belastbaren Aussagen aus den Experimenten kann frühestens in einigen Jahren gerechnet werden» (Landestopographie 2010, Fazit, Seite 22).

6.2.7. «Alle bisherigen und aktuellen **Gasexperimente** (HG-A, HG-D, HT, CS, CS-A), ... sind in der tonigen Fazies durchgeführt worden. Zukünftige Folgeexperimente **sollten die sandige Fazies berücksichtigen**» (Landestopographie 2014) (siehe 2.2.4).

6.2.8. «Daten für Gaseintrittsdrucke sind ausschliesslich aus der tonigen Fazies vorhanden. Hier wäre es durchaus wünschenswert, Vergleichsdaten aus der sandigen Fazies zu haben» (Landestopographie 2014) (siehe 2.2.4).

6.2.9. Aufstiege von CO₂-Gas durch Opalinuston-Formation (Landestopographie 2014; Frage 89 TFS 2012). «Das Felslabor Mont-Terri gibt einen Beitrag zur Beantwortung dieser Frage, da Gase im Forschungsprogramm eine wichtige Rolle spielen und die Gasproblematik in mindestens 12 Experimenten angegangen wurde und wird. Dabei spielt vor allem der Wasserstoff eine wichtige Rolle, der während der anaeroben Korrosion der Stahlbehälter entsteht. Aber auch die natürlichen vorkommenden Gase wie das **Kohlendioxid wurden und werden untersucht**» (Antwort EGT + Swisstopo 2014).

6.2.10. «Zur Beurteilung der Relevanz der Gasbildung durch Metallkorrosion und Degradation organischer Materialien sei auf Anhang A.6.2 verwiesen» (Nagra 2016).

6.2.11. Reaktiver Gastransport bei Wasserstoff (Sulfatreduktion und Bildung von Sulfiden).

6.2.12. «Wissensstand zum Gastransport unter typischen Lagerverhältnissen noch unzureichend Sättigungen mit frei fließenden Gas- und Wasserphasen gerechnet werden kann und wie der Übergang von der Kavernenverfüllung in den Opalinuston erfolgt, insbesondere bezüglich der Druck- und Sättigungsverhältnisse vor Beginn der (weiteren) Entsättigung des Opalinustons. ... Transportmechanismen dar: viele Fragen zum Gültigkeitsbereich des dilatanzgesteuerter Gasflusses sind offen. ... Da bezüglich einer eventuellen Rissbildung (sowohl für Mikro- als auch Makrorisse) notwendigerweise der Spannungszustand eine wesentliche Rolle spielt, wäre es notwendig eine **klare Vorstellung über die herrschenden Effektivspannungsverhältnisse** zu haben» (Emch & Berger 2009).

6.2.13. «E.22: Die Wirksamkeit der technischen Massnahmen für den Gastransport im geologischen Tiefenlager (z. B. EGTS) und deren Konsequenzen für die Langzeitsicherheit auf der Basis eines integralen standortspezifischen Lagerkonzepts ist aufzuzeigen. Aus Sicht des ENSI muss der Nachweis des von der Nagra vorgeschlagenen EGTS auch mit Ergebnissen aus weiteren Demonstrationsversuchen erbracht werden (ENSI 33/540). Das ENSI empfiehlt, bis zum Rahmenbewilligungsgesuch (RBG) **die maximale Wärmeleistung pro BE-Behälter im HAA-Lager in Hinblick auf den durch Temperatur und Gasbildung induzierten Druck in den Lagerstollen unter Berücksichtigung gekoppelter Prozesse neu zu bewerten (Kapitel 7.2.3.2, NTB 16-02)**. Zusätzlich empfiehlt das ENSI mögliche Verfüllmörtel für das SMA- und LMA-Lager zum RBG zu überprüfen und zu bewerten, um u. a. **sicherzustellen, dass die gewünschte Porosität für den Gastransport erreicht werden kann**» (ENSI 33/593, 2018).

- 6.2.14. «Das grundlegende Verständnis des **Gastransports** im gering durchlässigen Wirtgestein **wird weiter vertieft**» (Nagra 2016, Tab. 3-3 Seite A-24).
- 6.2.15. «Im Rahmen der internationalen Aktivitäten wird in den nächsten Jahren die Freisetzungsrates von ^{14}C in die gasförmige und flüssige Phase mit gezielten Versuchen bestimmt und bewertet. ... **Langzeitexperimente zur Gasproduktion aus organischen Materialien in SMA werden fortgesetzt zusammen mit Experimenten zur Korrosion** und Gasbildung von und aus Metallen» (Nagra 2016, Tab. 3-3 Seite A-25).
«Sie [KNS] merkt an, dass der Nachweis der Funktionalität allfälliger technischer Massnahmen zur Limitierung der möglichen negativen Auswirkungen der im Tiefenlager gebildeten Gase noch ausstehend ist. ...robuste Ansätze zur Lösung der Problematik der Gasentwicklung in einem geologischen Tiefenlager evaluiert werden sollten.... Reduktion der potenziellen Gasbildung aus metallischen Abfällen ... (KNS 2023).
- 6.2.16. «Die kontrollierte Ableitung von Gasen entlang den Zugangsbauwerken (EGTS, "Engineered Gas Transport System") wird weiter untersucht in Zusammenhang mit der Fortführung des GAST-Experiments (Gas-Permeable Seal Test) im Felslabor Grimsel. Dabei wird die Funktionstüchtigkeit der Sand/Bentonit-Versiegelung im Massstab 1:1 untersucht. Dies trägt zum Verständnis des Gas-/Wasser-Flusses unter Tiefenlagerrelevanten Bedingungen bei» (Nagra 2016, Tab. 3-3 Seite A-27).
- 6.2.17. «Die **Gasfreisetzung** aus einem HAA-Lager und die induzierten thermischen Überdrücke **werden vertieft untersucht**» (Nagra 2016, Tab. 3-3 Seite A-27).
- 6.2.18. «Im weiteren Prozess der Standortauswahl und der Lagerkonkretisierung sollten robuste Ansätze zur Lösung der Problematik der Gasentwicklung in einem geologischen Tiefenlager evaluiert werden» (KNS 2017).
- 6.2.19. «Auflage 5.1 zur Reduktion potenzieller Gasbildung. ... Das ENSI hat in seiner Stellungnahme zum EP16 festgehalten, dass es der Argumentation der Nagra folgt und die Reduktion und das Einschmelzen metallischer Abfälle ein höheres sicherheits-technisches Optimierungspotenzial bietet als die Reduktion der Organika. ... der Gassynthesebericht (Diomidis et al. 2016) aktualisiert. ... **der erwartete Druckaufbau der Gase keine negativen Auswirkungen auf die günstigen Eigenschaften des Opalinustons hat. ... keine Hinweise vorliegen, welche eine weitere Reduktion der Gasbildung als notwendig erachten liessen**» (Nagra NTB 21-01, S. A-59 (2023), A.8.1).
- 6.2.20. «Da die Nagra erst im Rahmenbewilligungsgesuch den Nachweis erbringen wird, dass der erwartete Druckaufbau der Gase keine negativen Auswirkungen auf die günstigen Eigenschaften des Opalinustons hat, bleibt die Auflage bis zur nächsten Aktualisierung des Entsorgungsprogramms bestehen» (ENSI Gutachten 2023, S. 62).
«Auch nach Einschätzung der KNS sollte die Auflage [5.1] bis zur nächsten Aktualisierung des Entsorgungsprogramms bestehen bleiben» (KNS 2023, S. 32).
- 6.2.21. «... 8.5.1 Description of near-field evolution: The bentonite buffer will become saturated within the first few hundreds of years (depending on the host rock properties), after which pore pressure in the buffer will increase to that in the surrounding host rock. Gas will be generated through corrosion of the steel used in tunnel support and the canisters and will percolate as a gas and/or aqueous phase through the engineered barriers and into the rock. Gas transport through the saturated bentonite and tunnel support will not cause any irreversible damage. Gas will follow the pathways with the lowest entry pressures, including connected pores along the largely sealed EDZ. ... Gas pressure evolution will counteract saturation, which may take tens of thousands of years. Model calculations indicate that there could be a period during which **gas will expel porewater from the caverns into the host rock and through the Engineered Gas Transport System (EGTS)**. The EGTS is, however, designed to prevent the occurrence of potentially damaging gas pressures» (NTB 21-02, S. 211-213).
- 6.2.22. «... the in-situ gas-relevant properties of the host rock cannot be characterised in detail. For the general licences, it has to be demonstrated that several options exist and that these can be implemented to meet the safety criteria with a sufficient margin (similar to Diomidis et al. 2016). **This ensures the existence of an adequate process understanding in terms of gas transport and gas generation and consumption for the performance assessments. An extensive RD&D programme is being completed to establish this knowledge base.** ... performance **assessments will be conducted based on a reliable model abstraction chain, which relies on 1:1 evidence that the Engineered Gas Transport System**

(EGTS – see insert in Section 8.5.2.2) is a valid option for mitigating gas pressures for the selected site(s)» (Nagra NTB 21-02, S. 115).

6.2.23. «The remarkable instrumentation of the FE tunnel (e.g., boreholes with multi-packer systems, several hundred sensors with the respective wiring) could be in part responsible for experimental artefacts that, with the limited amount of available gas data, cannot be clearly identified. For instance, the impact of EDZ and EDZ-like structures cannot be further constrained. Therefore, it would be useful to investigate in-depth the role of such structures with respect to the overall gas exchange within the frame of future research projects» (FE-G TN2018-85: On-line monitoring of the gas composition in the Full-scale Emplacement experiment at Mont-Terri)».

6.2.24. «Understanding the processes controlling the evolution of the gas phase composition within the bentonite backfill of an emplacement tunnel for HLW/SF» (FE-G 2019, 5-pager PP 25) (NTB15-02 2019, page 115, Fig. 7-35).

- Les phénomènes de production et de consommation de gaz sont-ils totalement compris, en particulier ceux de H_2 et O_2 ?

⇒ Nagra 21.11.2019: «The presence of gaseous H_2 is useful as indicator that anaerobic conditions are locally reached in the FE experiment. Several processes are competing for the capture of O_2 , e.g. dissolution in porewater and reaction with pyrite, corrosion of metals, and microbial respiration. The potential role of clays as a sink for O_2 , in particular montmorillonite in the bentonite backfill, are subject to additional investigations at Nagra».

6.2.25. Due to the plug design (being not tight ...) (NTB 15-02, page 5).

- Was the tightness of outgoing cables not conceptually optimized (NTB 15-02, page 61, 5.6 Design of the concrete plug)?

- Is another experiment foreseen to get a correct view without bias of the gas evolution?

⇒Nagra 21.11.2019 : «The plug was not designed to be entirely gas tight as characterization of the chemical evolution under isolated conditions was not an objective of the FE-experiment.

The objective to monitor THM evolution accurately was in conflict with a requirement to make the experiment gas tight. The plug was made vapor tight, but gas exchange through the EDZ is taking place».

6.2.26. Heating also led to release of hydrogen sulphide from the Opalinus Clay host rock (NTB15-02, pages 16-18).

- Is H_2S measured within FE-G experiment? Are sulphide compounds retrievable through silver-coated filter?

⇒ Nagra 21.11.2019: «Hydrogen sulfides results from the dissolution of pyrite, which is naturally present in OPA. The presence of H_2S cannot be confirmed in the FE-G experiment. Gaseous H_2S is very reactive and tends to be captured by most metallic surfaces (including Ag, or stainless steel) that are present in the FE experiment as well as in the gas sampling equipment.

It should be noted that production and behavior of H_2S in the near field is not part of the objectives of the FE experiment».

6.2.27. « La production de H_2 peut avoir deux origines : la radiolyse de la solution interstitielle présente dans la porosité de la matrice cimentaire, et la corrosion dans le cas de déchets métalliques » (CEA octobre 2021). André Herrmann : « La présence de H_2 est inévitable ; il est important de comprendre le comportement de ce gaz dans les conditions d'un dépôt souterrain de déchets radioactifs ».

«Gases are expected to be generated in a HLW repository as a result of anaerobic corrosion of metals (which produces H_2), degradation of organic matter (which may produce gaseous compounds such as CO_2 and CH_4 , which may incorporate ^{14}C) and radiolysis of water (which principally produces H_2)» (Nagra TR 14-13, Leupin 2016).

6.2.28. «In a deep geological repository, gases are generated as a result of the anaerobic corrosion of metals (which produces H_2), microbial and chemical degradation of organic matter (which may produce gaseous compounds, CO_2 , CH_4 , that may incorporate ^{14}C and other volatile radionuclides; see Section 8.3.3.5) and radiolysis of water (which principally produces H_2). Other gas sources such as helium generated through alpha decay are minor in comparison. If the production rate of gas is higher than can be taken up through dissolution and diffusion, a free gas phase will form and accumulate, with increasing gas pressures, that

will eventually be released along the backfilled underground structures or through the host rock.

The principal impact of gas is expected to be increased pore pressures, leading to changes in effective stress in the surrounding host rock and potentially affecting its mechanical integrity (reactivation of faults, creation of gas fractures). These effects, if they were to occur, could compromise requirements placed on the expected performance of the host rock, and performance targets for gas overpressure have been set accordingly. Adherence to these targets then has to be assessed (NTB 21-02) (8.2.2.2., S. 156).

S. 157: ...Nagra coordinates Task 3 ("barrier integrity"), associated with the gas-induced failure of clay barriers and the effectiveness of self-sealing processes along gas-induced pathways in the clay barriers. The evaluation will be accomplished using model-supported data analyses, predictive modelling and the application of new modelling tools to in-situ experiments.

S. 158: After completion of the site selection process, further analyses of gas release are envisaged, aimed at safety-related repository optimisation and performance assessment, contributing to the safety case for the general licence applications. ...

Completion of the EURAD GAS work package ... Special focus will be on the phenomena and processes related to gas-induced damage initiation and propagation and on self-sealing of gas-induced fractures. Representative core samples for laboratory experiments will be recovered as part of the deep borehole campaign [Konditionierung siehe 2.5.10].

S. 180: 8.3.3.5. Gas generation from L/ILW: The assessment of the impact of gas generation requires characterisation of the gas source term resulting from the corrosion of metals (H₂) and the decomposition of organic materials (CO₂, CH₄, H₂, H₂S). ...

Metals: An important outcome was the observation that cement also generates H₂ under anoxic conditions, mainly due to the presence in cement of metallic debris originating from the grinding of clinker. ... Preliminary results indicate a corrosion rate for stainless steel of 1 nm/y after 12 months and still decreasing in agreement with the literature (0.4 nm/y after 7 years) (Sakuragi et al. 2016).

Organics: Given the low proportion of organics in L/ILW, gas generation from the degradation of organics is significantly less important than the gas generation from the corrosion of metals (Diomidis et al. 2016). ... To gain more experimental data, a large-scale experiment for the measurement of gas generation rates from organic waste streams (ion-exchange resins and PVC), initiated in 2015, is ongoing at Zwiilag».

6.2.29. FE-G Experiment: Off-site analysis of gas samples Monitoring TN2021-55

«Stable isotopes of gas species: The origin of the organic material might be kerogen type I. ... the admixture of methane may be influenced by microbial processes, likely acetate fermentation».

«This note collects the results of gas measurements since 2014. Some paths are proposed to explain the characteristics of the different gases (kerogen type I or bacterial). It seems that the concentrations of gases C1 to C5 are higher at the bottom of the FE niche (samples FE_GAS_001 and FE_GAS_002) and that they decrease up the niche (FE_GAS_006 – FE_GAS_003; FE_GAS_010 and FE_GAS_007) until the plug (FE_GAS_008 and FE_GAS_009)» (Technical Note 2021-55, September 2021).

- It seems that the main source of C-gases is situated in the rear of the FE-Tunnel (ISS) and that a gas diffusion with gradient along the tunnel occurs. Is there another explanation for this?

6.2.30. Relevanz von Radon

Die Relevanz von ²²²Radon (T_{1/2}=3.8 Tage) aus ²³⁸Uran soll überprüft werden, insbesondere bei der Benützung eines EGT-Systems ("engineered gas transport system"), wodurch der Transport von Gasen nach Aussen wesentlich beschleunigt wird..

6.3. Wasser

6.3.1. «... Despite the still limited number of available pore-water analyses, the systematic proximity of their ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr ratios with those of the calcite from most microstructures of the Main Fault points towards the possibility that these free waters are still able to circulate along the Opalinus Clay micrometer-thin shear zones and potentially along veins and slickensides. Alternatively, they seem not to diffuse into the undeformed matrix.

A further pending question is about the origin of the present-day free waters, and about the extent of their interactions with the host rocks for which the envisioned interpretation has still to be tested, improved and consolidated, possibly on the basis of an enlarged analytical database.

The Sr isotopic ratio of the diffuse calcite from undeformed matrix suggests that the rock volume within the fault has been slightly contaminated by the fluid flows that circulated in the microtectonic structures, diffusing discretely into the surrounding host rock. (Geochemical signature of paleofluids in microstructures from Main Fault in the Opalinus Clay of the Mont-Terri rock laboratory, Switzerland ... Chr. Nussbaum et al. Swiss J Geosci, 2017).

Hydrogeological and hydrogeochemical conditions: Due to the significant developments in isotope analytics that have recently taken place, important progress is expected, especially in the determination of residence times for very old groundwaters based on ^{81}Kr , as has recently been successfully accomplished in the Southern German Molasse Basin (Heidinger et al. 2019).

Porosity: For the conditions expected in the siting regions of Northern Switzerland, the impact of ionic strength on variation in anion accessibility along a borehole profile is expected to be small (Nagra NTB 21-02, 8.2.1.4) (S. 141).

S. 142: Following an early phase during which methods for sampling and characterising porewater and rocks were developed (Pearson et al. 2003) and applied in the deep borehole in Benken (Nagra 2002c), as well as further development mainly in collaboration with the University of Bern and/ or in the Mont-Terri Rock Laboratory (notably the Analyses of Geochemical Data (GD) experiment), these methods and the resulting insight reached a stage where targeted projects could be carried out to resolve remaining questions».

6.3.2. «The in-situ and laboratory investigation indicate that the Opalinus clay is neither water- nor gas-tight. For long-term safety aspects it has to be taken into account that generated and released gases can migrate into open areas of the repository and water can migrate within the Opalinus clay formation» (HE-B Heater Test in the Opalinus Clay of the Mont-Terri URL, GRS 2006) (See also 2.2.4.).

- Quelles conclusions peuvent être tirées de ces constats ? Quelles recherches futures pour évaluer ces effets sont prévues ?

7. Glossar

AdK	Ausschuss der Kantone/Comité des cantons (www.radioaktiveabfaelle.zh.ch)
AG SiKa	Arbeitsgruppe Sicherheit der Kantone/Groupe d'experts des cantons
BFE/OFEN	Bundesamt für Energie/Office fédéral de l'énergie
BE	Brennelemente/Barre de combustible nucléaire
CS	Commission de suivi du MTP
CSN/KNS	Commission fédérale de la sécurité nucléaire/Eidg. Kommission für nukleare Sicherheit
EGT	Expertengruppe Geologische Tief Lagerung
EGTS	Engineered gas transport system
ETH	Eidg. Technische Hochschule Zürich
FE	Expérience FE (Full scale Emplacement) au MTP
GD	Analysis of Geochemical Data at MTP
GTS	Grimsel Test Site (laboratoire souterrain de la Nagra au Grimsel)
HAA	Hochaktive Abfälle (déchets hautement radioactifs, DHR)
HF	Expérience HF (Hydraulic Fracturing) au MTP
HT	Expérience HT (Hydrogen Transfer) au MTP
IFSN/ENSI	Inspection fédérale de la sécurité nucléaire/Eidg. Nuklearsicherheitsinspektorat
KES	Kantonales Expertengruppe Sicherheit
LMA	Langlebige mittelaktive Abfälle
LMT	Laboratoire du Mont-Terri
MA	Expérience MA (Microbial Activity) au MTP
MTP	Mont-Terri Project
Nagra	Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle
Nagra 21.11.2019	Réponse de la Nagra aux questions spécifiques de la CS
NTB	Nagra Technischer Bericht
OPA	Opalinuston
RBG	Rahmenbewilligungsgesuch/Demande d'autorisation générale
SES	Schweizerische Energie-Stiftung (https://energienstiftung.ch)
SMA	Schwach- und mittelaktive Abfälle/Déchets faiblement et moyennement radioactifs (DFMR)
Swisstopo	Office fédérale de topographie/Bundesamt für Landestopographie
TD	Technical Discussion at MTP
TFS+TFE	Technisches Forum Sicherheit/Plan sectoriel et démonstration de la faisabilité du stockage des déchets radioactifs (https://www.ensi.ch/de/technisches-forum-sicherheit-entsorgung/)
THM	Thermo-Hydro-Mechanical
TN	Technische Notiz (Nagra)
TRL	Technological readiness level

8. Quellen

- Bundesrat Verfügung 21.11.2018;
<https://www.admin.ch/gov/de/start/dokumentation/medienmitteilungen.msg-id-73055.html>
- Bundesrat zum EP21
<https://www.bfe.admin.ch/bfe/fr/home/actualites-et-medias/communiqués-de-presse/mm-test.msg-id-95323.html>
- AdK, Ausschuss der Kantone, Stellungnahme zu Etappe 2, September 2017
<https://www.zh.ch/de/umwelt-tiere/abfall-rohstoffe/radioaktive-abfaelle-tiefenlager/ausschuss-der-kantone-sicherheit.html>
- AG SiKA/KES, Fachbericht zu Etappe 2, August 2017;
<https://www.ag.ch/media/kanton-aargau/bvu/raumentwicklung/projekte/sachplan-geologisches-tiefenlager/fachbericht-agsika-kes-2017-sgt-etappe2-def-allein-mitzf-ex.pdf>
- Amphos21 2015; <https://en.amphos21.com>
- Bossart Paul 2018, Präsentation vor der Commission de suivi am 7. Januar 2018
Bossart Paul 2021, 25 Years Mont-Terri Rock Laboratory, Commemorative publication
- Buser Marcos, courriels et Actes 2020 de la Société jurassienne d'Émulation
- CEA, Les défis du CEA: www.cea.fr
- EGT, Expertengruppe Geologische Tiefenlagerung <http://www.egt-schweiz.ch>
- Emch & Berger AG; Gutachten zur Beurteilung der Auswirkungen der Gasentwicklung im Tiefenlager; Dezember 2009;
https://www.ensi.ch/fr/wp-content/uploads/sites/4/2012/05/ensi_33-066_expertenbericht_emch_berger_gutachten-zur-beurteilung-der-auswirkungen-der-gasentwicklung-im-tiefenlager.pdf
- ENSI 2017: Stellungnahme zum Entsorgungsprogramm 2016 der Entsorgungspflichtigen, ENSI 33/592; ENSI, Brugg, Entwurf Oktober 2017, aktualisiert im April 2018;
<https://www.bfe.admin.ch/bfe/en/home/supply/nuclear-energy/radioactive-waste/waste-disposal-principles/waste-management-programme.html>
- ENSI 33/593; Empfehlungen und Hinweise aus der Beurteilung des Entsorgungsprogramms und des RD&D-Plans 2016; April 2018;
https://www.ensi.ch/de/wp-content/uploads/sites/2/2018/05/ENSI_33_593.pdf
- ENSI 33/915; Gutachten zum Entsorgungsprogramm 2021 der Entsorgungspflichtigen, Mai 2023, <https://www.ensi.ch/de/2023/05/23/entsorgungsprogramm-2021-ensi-stellt-sieben-antraege-fuer-auflagen/>
- IFSN 2023: zum EP21, Mai 2023 <https://www.ensi.ch/de/dokumente/hinweise-aus-der-beurteilung-des-entsorgungsprogramms-und-des-rdd-plans-2021/>
- ETHZ 2009 und 2015 sowie von Moos 2015;
https://www.ensi.ch/wp-content/uploads/sites/2/2017/04/Assessment_Geomechanical_Properties_Maximum_Depth_EDZ_Impact-ENSI_33_460_final.pdf
- Giamboni Marzio, interne Notiz der Commission de suivi 2017
- KNS, Kommission für nukleare Sicherheit
<https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/versorgung/aufsicht-und-sicherheit/kommissionen-und-inspektorate/eidgenössische-kommission-fuer-nukleare-sicherheit-kns.html/>
- KNS 2010: Sachplan geologische Tiefenlager Etappe 1, Stellungnahme zum sicherheitstechnischen Gutachten des ENSI zum Vorschlag geologischer Standortgebiete, April 2010, KNS 23/219;
<https://pubdb.bfe.admin.ch/de/publication/download/5030>
- KNS 2011: Sachplan geologische Tiefenlager Etappe 2, Stellungnahme zur Notwendigkeit ergänzender geologischer Untersuchungen in Etappe 2, Juni 2011, KNS 23/247; <https://pubdb.bfe.admin.ch/de/publication/download/5875>
- KNS 2018: Stellungnahme des ENSI zum Entsorgungsprogramm 2016 der Entsorgungspflichtigen, Stellungnahme der KNS, April 2018, KNS-02858;
<https://www.bfe.admin.ch/bfe/en/home/supply/nuclear-energy/radioactive-waste/waste-disposal-principles/waste-management-programme.html>
- KNS 2023: zum Gutachten des ENSI April 2023
<https://www.newsd.admin.ch/newsd/message/attachments/78672.pdf>
- Landestopografie/Swisstopo 2010 und 2014
- Minutes of the FE-M Technical Discussions 2020 and 2021

- Nagra Technischer Bericht NTB 21-01, Dezember 2021; <https://nagra.ch/downloads/technischer-bericht-ntb-21-01/>
 - Nagra Technischer Bericht NTB 21-02, Dezember 2021; <https://nagra.ch/downloads/technical-report-ntb-21-02/>
 - Nagra Technischer Bericht NTB 16-01, Dezember 2016; <https://www.Nagra.ch/de/technischer-bericht-16-01>
 - Nagra Technischer Bericht NTB 16-02, Dezember 2016; <https://www.Nagra.ch/de/technical-report-16-02>
 - Nagra Technischer Bericht NTB 15-02, Mai 2019; <https://www.Nagra.ch/de/technical-report-15-02>
 - OFEN 2023: zum EP21, 24.04.2023 <https://www.bfe.admin.ch/bfe/fr/home/approvisionnement/energie-nucleaire/dechets-radioactifs/bases-de-la-gestion-des-dechets/programme-de-gestion-des-dechets.html>
 - RCJU, Autorisations annuelles de la République et Canton du Jura
 - SES Schweizerische Energie Stiftung, Atommüll XY ungelöst 2011; <https://www.energiestiftung.ch/publikation-weitere/ses-broschuere-atommuell-xy-ungeloest.html>
 - Swisstopo/Landestopographie, Fieldreports, Working Programs
 - Tecova TD-216 2012; https://extranet.mont-terri.ch/MONT_TERRI_BASIS/7_SECURITY/72_RISKS_ANALYSIS/Gas/Compilation_Gas_experiments.pdf
 - Technical Notes on the Extranet; https://extranet.mont-terri.ch/test.html?prefix=MONT_TERRI_BASIS/2_REPORTING/1_Technical_notes
 - Technical Reports on the Extranet; https://extranet.mont-terri.ch/test.html?prefix=MONT_TERRI_BASIS/2_REPORTING/2_Technical_reports/TR/
 - TFE, Technisches Forum Entsorgungsnachweis <https://www.ensi.ch/de/technisches-forum/>
 - TFS, Technisches Forum Sicherheit: BFE, ENSI, Swisstopo, EGT, KNS, Nagra, Kantone, Nachbarländer, NGO. Fragen 44-163 (Fragen von 2010 bis September 2022 betrachtet) <https://www.ensi.ch/de/technisches-forum/?question-forum=bfe-technisches-forum-sicherheit>
 - Universität Bern, 2021: Carbon-14 release and speciation during corrosion of irradiated steel under radioactive waste disposal conditions <https://boris.unibe.ch/164498/>
 - WP, Work Programs 23 (2017), 24 (2018), 25 (2019), 26 (2020), 27 (2021) and 28 (2022) of LMT https://extranet.mont-terri.ch/test.html?prefix=MONT_TERRI_BASIS/8_WORK_PROGRAMMES
-