

Summary

This report presents a comprehensive description of the post-closure radiological safety assessment of a repository for spent fuel (SF), vitrified high-level waste (HLW) from the reprocessing of spent fuel and long-lived intermediate-level waste (ILW), sited in the Opalinus Clay of the Zürcher Weinland in northern Switzerland. This assessment has been carried out as part of the technical basis for Project *Entsorgungsnachweis*¹, which also includes a synthesis of information from geological investigations of the Opalinus Clay and a report on engineering feasibility. Project *Entsorgungsnachweis* is a milestone in the programme for the management of SF, HLW and ILW and represents an evaluation of the feasibility of the disposal of these wastes in Switzerland. It is also a major step on the way towards repository implementation.

The two main objectives of Project *Entsorgungsnachweis* are:

1. To demonstrate disposal feasibility of SF, HLW and ILW in the Opalinus Clay of the Zürcher Weinland in order to fulfil the requirements defined by the Federal Council in 1988 in its judgement of Project Gewähr 1985. This includes a demonstration that
 - a suitable geological environment for the repository exists (siting feasibility),
 - construction and operation of a repository is practicable in such an environment (engineering feasibility),
 - long-term safety from the hazards presented by the wastes is assured for such a repository (safety feasibility).
2. To provide a platform for discussion and a foundation for decision-making on how to proceed with the Swiss HLW programme. This includes a presentation of the key findings and results and a discussion of the underlying scientific basis. The excellent results obtained from the geological investigations led Nagra to propose to the Swiss Government to make a decision to focus future work for the waste management option "Disposal of SF / HLW / ILW in Switzerland" on the Opalinus Clay of the Zürcher Weinland². Thus an additional objective is to provide the arguments to support such a decision. This proposal is supported by a long and systematic site selection procedure, which was developed in close cooperation with the regulatory authorities and with experts from the Federal Government. This step-wise procedure of narrowing down from (i) seven potential sedimentary host rock options to one (Opalinus Clay) and (ii) from two large regional investigation areas for Opalinus Clay to the potential siting area in the Zürcher Weinland is documented in several Nagra reports and summarised in a note by the regulator (see Chapter 1 of the present report for details). Discussion on the content and the timing of future work will follow the review of Project *Entsorgungsnachweis*.

Additional objectives of the project are:

3. To provide input for overall waste management planning (including cost estimates), to form a benchmark for assessing design alternatives and inventory variants (SF, HLW and various types of ILW) and to allow applied research and development priorities to be re-assessed to address any remaining safety-relevant issues and uncertainties.
4. To provide input for discussions of waste management issues with all stakeholders, most importantly with the public. Such discussions can contribute significantly to building an

¹ The German term is also used in the English version of this report. The term translates into English as "demonstration of disposal feasibility".

² Disposal abroad is also an officially recognised option of the Swiss waste management strategy.

understanding of these issues, which in turn can lead to more constructive dialogue and perhaps increase public acceptance of waste management plans, including the implementation of repositories.

Specific aims of the safety assessment (this report) are:

1. To determine the suitability of the Opalinus Clay of the Zürcher Weinland as a host rock for the repository from the point of view of long-term safety.
2. To enhance the understanding of the multiple safety functions that the proposed disposal system provides.
3. To assess the robustness of the disposal system with respect to remaining uncertainties and the effects of phenomena that may adversely affect the safety functions.
4. To provide a platform for the discussion of a broad range of topics related to repository development. More specifically, the findings from the safety assessment, together with those from the regulatory authorities' review thereof, will provide guidance for future stages of repository planning and development.

Operational phase safety is not treated in this report, but is addressed in the engineering feasibility report on a qualitative level. The present report is restricted to post-closure radiological safety issues.

This report presents the arguments that together comprise the *safety case*, i.e. the case for the long-term safety of a repository for SF, HLW and ILW located in the Opalinus Clay of the Zürcher Weinland. The definition of this central term is as follows:

Safety Case

The safety case is the set of arguments and analyses used to justify the conclusion that a specific repository system will be safe. It includes, in particular, a presentation of evidence that all relevant regulatory safety criteria can be met. It includes also a series of documents that describe the system design and safety functions, illustrate the performance, present the evidence that supports the arguments and analyses, and that discuss the significance of any uncertainties or open questions in the context of decision making for further repository development.

Next, the key points are briefly introduced.

Chapter 1, as the introductory chapter, aims at **putting the present report into context**³. With five nuclear power plants in operation (the first one since 1969), a substantial amount of radioactive wastes exists today in Switzerland that requires careful long-term management. A corresponding, detailed waste management concept is available: State-of-the-art interim storage facilities with enough capacity for all radioactive wastes of Swiss origin are in operation, and, for subsequent geological disposal of the wastes, there are detailed plans for two repositories (one for low-and intermediate level waste and one for SF, HLW and ILW). Key points of the legal framework include: (i) Radioactive waste arising in Switzerland shall, in principle, be disposed of in Switzerland (although the laws define the conditions under which, by way of an exception, an export licence for disposal of such wastes abroad may be granted); and (ii) in

³ Status: August 31, 2002. The consequences of the negative outcome of the public referendum on the concession for an investigation gallery for the proposed L/ILW repository at Wellenberg are not discussed in this report.

Switzerland, the producers of radioactive waste are legally responsible for its safe management and disposal. To carry out their waste disposal responsibilities, the electricity supply utilities, which operate the nuclear power plants, and the Federal Government, which is responsible for the management of waste arising from medicine, industry and research, set up the National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste (Nagra) in 1972. Nagra is responsible for research and development work associated with final disposal. Other aspects of the waste management process, such as conditioning, interim storage and construction and operation of repositories, remain the responsibility of the individual waste producers or of organisations that may be set up by the producers specifically for these purposes. The Swiss Federal Nuclear Safety Inspectorate (HSK) is the supervisory authority. The Federal Commission for the Safety of Nuclear Installations (KSA) is responsible for evaluating projects for nuclear installations including radioactive waste repositories and for submitting to the Energy Department statements on the licensing applications and the reviews from HSK. In HSK's and KSA's guideline HSK-R-21, the protection objectives for disposal of radioactive waste are defined. One key argument of any Swiss safety case, including the current one, is the demonstration of compliance with this guideline. Finally, the step-wise approach to repository implementation is introduced; this includes a brief discussion of major past and future steps.

Chapter 2 is about **guidance and principles for choosing the disposal system and evaluating its long-term safety**. International guidance, the Swiss legal and regulatory framework and regulatory guidance are introduced and discussed. Key points include the draft of the revised Swiss Nuclear Energy Law (KEG⁴) and the Swiss regulatory guideline HSK-R-21. The KEG explicitly requires disposal in a geological repository, which must be monitored for some time before final closure. This requirement is based on the concept of "monitored long-term geological disposal" as proposed by the government advisory group, EKRA⁵. All these documents, all of which influence the approach to providing and analysing safety, are supplemented by additional guidance developed internally by Nagra based on its experience both in Switzerland and through its interaction with other organisations abroad. This includes a discussion of the concept of robustness, the role and treatment of the biosphere, the treatment of future human actions and the timescales of concern. All this information comes from many different sources and is rather heterogeneous. Therefore, the major findings are grouped and summarised in the following objectives and principles: (i) Objectives of geological disposal, (ii) objectives related to the system (including the *safety functions* of the disposal system, which are central to the development of the safety case), (iii) objectives related to stepwise implementation, (iv) assessment principles. Because of their important role, the safety functions are listed and defined explicitly below:

⁴ Short for "Kernenergiegesetz" (Nuclear Energy Law).

⁵ Short for "Expertengruppe Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle" (Expert Group on Disposal Concepts for Radioactive Waste) set up by the Swiss Government in June 1999.

Safety Functions

The disposal system performs a number of functions relevant to long-term security and safety. These are termed safety functions; they include:

- **Isolation from the human environment** – The safety and security of the waste, including fissile material, is ensured by placing it in a repository located deep underground, with all access routes backfilled and sealed, thus isolating it from the human environment and reducing the likelihood of any undesirable intrusion and misapplication of the materials. Furthermore, the absence of any currently recognised and economically viable natural resources and the lack of conflict with future infrastructure projects that can be conceived at present reduces the likelihood of inadvertent human intrusion. Finally, appropriate siting ensures that the site is not prone to disruptive events and to processes unfavourable to long-term stability.
- **Long-term confinement and radioactive decay within the disposal system** – Much of the activity initially present decays while the wastes are totally contained within the primary waste containers, particularly in the case of SF and HLW, for which the high integrity steel canisters are expected to remain unbreached for at least 10 000 years. Even after the canisters are breached, the stability of the SF and HLW waste forms in the expected environment, the slowness of groundwater flow and a range of geochemical immobilisation and retardation processes ensure that radionuclides continue to be largely confined within the engineered barrier system and the immediately surrounding rock, so that further radioactive decay takes place.
- **Attenuation of releases to the environment** – Although complete confinement cannot be provided over all relevant times for all radionuclides, release rates of radionuclides from the waste forms are low, particularly from the stable SF and HLW waste forms. Furthermore, a number of processes attenuate releases during transport towards the surface environment, and limit the concentrations of radionuclides in that environment. These include radioactive decay during slow transport through the barrier provided by the host rock and the spreading of released radionuclides in time and space by, for example, diffusion, hydrodynamic dispersion and dilution.

Chapter 3 defines the **methodology for developing the safety case**, i.e. the approach to the evaluation of long-term safety of the proposed repository, based on the assessment principles introduced in Chapter 2. Key points include: (i) The identification of the necessary steps in developing the safety case, and (ii) the definition of the lines of argument contributing to the safety case. These points are given in more detail below.

(i) The making of the safety case involves:

- the choice of a disposal system, via a flexible repository development strategy, that is guided by the results of earlier studies, including studies of long-term safety,
- the derivation of the system concept, based on current understanding of the features, events and processes (FEPs) that characterise, and may influence, the disposal system and its evolution,
- the derivation of the safety concept, based on well understood and effective pillars of safety,
- the illustration of the radiological consequences of the disposal system through the definition and analysis of a wide range of assessment cases, and

- the compilation of the arguments and analyses that constitute the safety case, as well as guidance for future stages of the repository programme.
- (ii) Lines of argument that contribute to the safety case are related to:
- the strength of geological disposal as a waste management option,
 - the safety and robustness of the chosen disposal system,
 - the reduced likelihood and consequences of human intrusion,
 - the strength of the stepwise repository implementation process,
 - the good scientific understanding that is available and relevant to the chosen disposal system and its evolution,
 - the adequacy of the methodology and the models, codes and databases that are available to assess radiological consequences,
 - the multiple arguments for safety that include compliance with regulatory safety criteria, the use of complementary safety indicators, the existence of reserve FEPs and the lack of outstanding issues with the potential to compromise safety.

Chapter 4 documents the current understanding of the characteristics of the proposed disposal system in the Opalinus Clay of the Zürcher Weinland at the time of repository closure. The disposal system is sited and designed in accordance with the objectives and principles introduced in Chapter 2. The following elements are described in some detail: (i) key features of the site, (ii) key properties of the Opalinus Clay host rock, (iii) the repository layout, (iv) waste quantities and characteristics (SF, HLW and ILW), (v) the engineered barrier system and repository design. These elements are described in more detail below.

(i) Key features of the site include:

- The geological environment is simple, with predictable structural, hydrogeological and geochemical properties.
- The siting area is tectonically stable over the relevant timescales, with a low rate of uplift and associated erosion.
- The sediments overlying the basement in this region, and the basement rocks themselves, are not considered to have any significant natural resource potential.

(ii) Key properties of the Opalinus Clay host rock include:

- The Opalinus Clay has such a low hydraulic conductivity that solute movement through the formation is predominantly by diffusion rather than advection.
- The geochemical conditions in the Opalinus Clay are reducing, slightly alkaline and moderately saline and favour the preservation of the engineered barriers and radionuclide retention.
- The geochemical environment in the Opalinus Clay and surrounding formations is expected to remain effectively stable for several million years⁶.
- The properties of the Opalinus Clay ensure that repository-induced and natural fractures will be of very low hydraulic conductivity due to the self sealing capacity of the Opalinus Clay; i.e. their effect on the hydraulic properties of the Opalinus Clay will be negligible.

⁶ Only a minor salinity decrease is expected to occur over this timescale.

- The Opalinus Clay is an indurated claystone (clay shale) with reasonable engineering properties, allowing small, unlined tunnels and larger, lined tunnels to be constructed at depths of several hundred metres.

(iii) Key features of the repository layout include:

- an access ramp, construction and operations tunnels, central waste receiving facilities and a construction/ventilation shaft,
- an array of parallel, near-horizontal emplacement tunnels for SF / HLW, with a diameter of 2.5 m and a distance between tunnels of 40 m,
- three short horizontal emplacement tunnels for ILW located at a distance of several hundred metres away from the SF / HLW part of the repository,
- pilot and test facilities in accordance with the EKRA concept.

(iv) Key points regarding the waste include:

- Waste quantities are estimated based on the assumption of a 60 years operational lifetime of the five nuclear power plants currently in operation in Switzerland, corresponding to a total electricity production of 192 GWa(e).
- The quantities of SF on one hand and of HLW/ILW on the other hand are estimated based on the assumption that only that total amount of SF is reprocessed for which reprocessing contracts exist (1195 t_{HM}).
- This leads to about 3200 t_{HM} or 2065 canisters of SF, 730 canisters of HLW and about 7300 m³ of (conditioned) ILW.

(v) Key features of the engineered barrier system include:

- The SF canister - the reference design concept is a cast steel body, with a machined central square channel fitted with crossplates to permit emplacement of either 4 PWR or 9 BWR fuel assemblies, with a minimal wall thickness of 15 cm, a length of about 5 m and a diameter of about 1 m.
- The HLW canister - the reference design is the same as in the Project *Gewähr* study; i.e. a steel canister containing one stainless steel flask of HLW glass, with a wall thickness of 25 cm, a length of about 2 m and a diameter of about 1 m.
- The ILW containers - the ILW drums are incorporated into concrete emplacement containers, with cementitious mortar used to fill the void spaces around the drums.
- Backfilling (SF / HLW emplacement tunnels) - the SF / HLW canisters are placed on highly compacted bentonite blocks, co-axially with the tunnel axis, with a distance of 3 m between the canisters, and the region around the canisters backfilled with granular bentonite.
- Backfilling (ILW emplacement tunnels) - after emplacement of the ILW containers in the ILW tunnels, the void regions within the emplacement tunnels are filled with a cementitious mortar.
- Backfilling (operations and construction tunnels, central area, ramp) - the operations and construction tunnels, the central area and the ramp are backfilled with a bentonite-sand mixture, with seals of highly compacted bentonite contained between bulkheads placed at several locations. The shaft will be sealed with highly compacted bentonite.

Chapter 5 is a **description of how the disposal system could evolve with time** after repository closure, taking into account the interactions of individual system components. This includes a discussion of the evolution of the site and of the engineered barriers. Besides describing the expected evolution of the disposal system, possible deviations from this course are also discussed. This is the basis for the development of the range of assessment cases that are quantitatively analysed in detail in this report.

Chapter 6 analyses **the relative importance of the different features and phenomena and identifies the assessment cases**. It includes deterministic sensitivity analyses of the consequences of possible deviations from the expected evolution, based on the *safety functions* defined in Chapter 2, as well as complementary probabilistic safety / sensitivity analyses. Based on a qualitative discussion and on insight from the quantitative analyses, the key features and phenomena contributing to the safety functions are identified; these are termed *pillars of safety*. Because of their important role in developing the safety case, they are listed and defined explicitly below:

Pillars of Safety

The pillars of safety are features of the disposal system that are key to providing the *safety functions*:

- **The deep underground location of the repository**, in a setting that is unlikely to attract human intrusion and is not prone to disruptive geological events and to processes unfavourable to long-term stability;
- **the host rock** which has a low hydraulic conductivity, a fine, homogeneous pore structure and a self-sealing capacity, thus providing a strong barrier to radionuclide transport and a suitable environment for the engineered barrier system;
- **a chemical environment** that provides a range of geochemical immobilisation and retardation processes, favours the long-term stability of the engineered barriers, and is itself stable due to a range of chemical buffering reactions;
- **the bentonite buffer (for SF and HLW)** as a well-defined interface between the canisters and the host rock, with similar properties as the host rock, that ensures that the effects of the presence of the emplacement tunnels and the heat-producing waste on the host rock are minimal, and that provides a strong barrier to radionuclide transport and a suitable environment for the canisters and the waste forms;
- **SF and HLW waste forms** that are stable in the expected environment;
- **SF and HLW canisters** that are mechanically strong and corrosion resistant in the expected environment and provide absolute containment for a considerable period of time.

Assuming first that the pillars of safety operate as expected, and then considering possible perturbations (based on the discussion in Chapters 4 and 5 and selected using the insight gained in the sensitivity analysis), the cases for quantitative assessment are identified.

Chapter 7 presents **the results of the analysis of the assessment cases** identified in Chapter 6. It starts with a description of the conceptualisation of the assessment cases, which are structured according to the various possible evolutions of the disposal system (scenarios) that determine the main pathway of radionuclide release. For a given scenario, different conceptualisations are considered, and for a given conceptualisation, data uncertainty is evaluated by parameter variations.

The starting point is the Reference Case, based on the Reference Conceptualisation of the Reference Scenario, which envisages a repository with a near field evolving according to the design functions of the engineered barriers, a geosphere based on the current understanding of the geological environment and a biosphere based on present-day geomorphological, hydro-geological and climatic conditions, with conservative assumptions regarding human behaviour and diet. Alternative conceptualisations of the Reference Scenario address phenomena in the near field and the geosphere where uncertainty exists about their importance for the reference radionuclide release pathway. Data uncertainty within alternative conceptualisations is investigated by parameter variations. The effects of uncertainty in the future evolution of the system is explored by means of alternative scenarios. As in the Reference Scenario, different conceptualisations and parameter variations are considered in the alternative scenarios. In order to test the robustness of the repository system, a category of "what if?" cases has been introduced addressing phenomena that are outside the range of possibilities supported by scientific evidence. To limit the number of "what if?" cases, they are restricted to those that explore perturbations to key properties of the pillars of safety. The list of "what if?" cases is not intended to be exhaustive, but is meant to illustrate system behaviour under extreme conditions.

Design and system options are evaluated separately, because they address conceptualisations where flexibility, rather than uncertainty, exists in the characteristics of the repository system.

The sensitivity of radionuclide transport in the biosphere is illustrated by a number of assessment cases related to alternative geomorphological and climatic conditions. In the framework of this group of cases, the focus is on illustrating the effect of uncertainties related to the biosphere using different (stylised) possibilities for the characteristics and evolution of the surface environment.

Chapter 8 is a synthesis of the main arguments and results. It represents the final step in compiling the safety case. It looks again at each of the lines of argument identified in Chapter 3 and summarises the findings that support them. Specifically:

- The strength of geological disposal as a waste management option is supported by (i) the internationally recognised fact that a well-chosen disposal system located at a well-chosen site fulfils the requirement of ensuring the safety and protection of humans and the environment, as well as security from malicious intervention, now and in the future, (ii) by the existence of suitable rock formations in Switzerland and elsewhere, (iii) by other safety assessments conducted world-wide, (iv) by observations of natural systems, and (v) by the relative advantage of geological disposal versus other options.
- The safety and robustness of the disposal system is ensured by (i) a set of passive barriers with multiple phenomena contributing to the safety functions, (ii) by the avoidance of uncertainties and detrimental phenomena through an appropriate choice of site and design, and (iii) by the long-term stability of the Opalinus Clay host rock and the repository due to a suitable geological situation.
- The reduced likelihood and consequences of human intrusion is supported by (i) the preservation of information about the repository, (ii) by the avoidance of resource conflicts (i.e. the absence of viable natural resources in the area proposed for the repository), and (iii) by the compartmentalisation of the repository and the solidification of the wastes.
- The strength of the stepwise repository implementation process is supported by (i) the fact that at the current project stage, not all the details of the repository system need to be fixed and, therefore, the information basis only needs to be adequate for that particular stage, (ii) by the reliance on understood and reliably characterised components (site, EBS), (iii) by the involvement of stakeholders and the opportunities for feedback and improvements,

(iv) by the flexibility of the project, allowing to take into account new findings (e.g. regarding the detailed allocation of emplacement tunnels, choice of design options, placement of surface facilities, and even siting; i.e. other possible sites for the Opalinus Clay host rock option as well as for other host rock options exist), and (v) by the possibilities for monitoring and reversal (including retrieval of the wastes).

- The good scientific understanding that is available and relevant to the chosen disposal system and its evolution is supported by (i) the results from regional and local field investigation programmes, which included, as key elements, an extensive 3 D seismic campaign and an exploratory borehole in the potential siting area and the availability of information from other boreholes in the region, as well as complementary studies performed in the Mont Terri underground rock laboratory and in other laboratories, as well as observations of Opalinus Clay in a number of railway and road tunnels, (ii) by the findings from more than 20 years of experience in developing and characterising engineered barrier system components within the Swiss programme, as well as by the availability of a strong international information basis, and (iii) by the availability of a detailed model waste inventory for SF, HLW and ILW.
- The adequacy of the methodology and the models, codes and databases that are available to assess the radiological consequences for a broad spectrum of cases is supported by the adherence to the assessment principles outlined in Chapter 2 (especially by the adequacy of the consideration and treatment of uncertainties and the use of validated and verified models to evaluate the assessment cases).
- Compliance with legal and regulatory requirements is supported by (i) the fact that in all of the assessment cases considered, dose maxima are below the Swiss regulatory guideline; in many cases by several orders of magnitude, (ii) by the consistency of the proposed repository with the requirement that, at any time during a possible extended monitoring phase, it could be sealed within a few years, and that it does not rely for safety on any further measures after it has been sealed, and (iii) by the implementation of the concept of monitored long-term geological disposal.
- The use of alternative safety indicators includes, in addition to dose and risk, (i) radiotoxicity of the wastes as a function of time, which is compared with that of naturally occurring radionuclides, (ii) radiotoxicity fluxes due to radionuclides released from the repository in the course of time, which are compared with natural radiotoxicity fluxes in the surface environment, (iii) radiotoxicity concentrations originating from the repository at the top of the Opalinus Clay compared with natural radiotoxicity concentrations in Opalinus Clay, and (iv) the assessment of the distribution of radiotoxicity in the different system components as a function of time.
- Positive phenomena that are not included in the safety calculations due to limitations in the available tools (Reserve FEPs) are additional arguments for safety. Reserve FEPs that have been identified include (i) the co-precipitation of radionuclides with secondary minerals derived from spent fuel, glass and canister corrosion (except for co-precipitation of radium, which is included in all cases), (ii) sorption of radionuclides on canister corrosion products, (iii) natural concentrations of isotopes in solution in bentonite porewater, which could further reduce the effective solubilities of some radionuclides, (iv) irreversible sorption of radionuclides in the near field or in the geosphere (surface mineralisation), (v) long-term immobilisation processes in the geosphere (precipitation / co-precipitation), (vi) the delayed release of radionuclides, due to the slow corrosion rate of ILW metallic materials (e.g. hulls and ends), as well as a period of complete containment by ILW steel drums and emplacement containers, and (vii) the long resaturation time of the repository and its surroundings, which delays the commencement of corrosion and dissolution processes.

- Further reserves are available because of the simplified and conservative or pessimistic representation of the system in some of the assessment cases.
- Despite a detailed analysis of a wide range of assessment cases that were derived in a careful and methodical way, no outstanding issues with the potential to compromise safety have been identified.

Chapter 9 presents the **overall conclusions**:

1. Project *Entsorgungsnachweis* is a response to the request by the Swiss Government for a convincing demonstration of siting feasibility following the Government's review of the earlier Project Gewähr. The work described in the present report has shown that disposal is feasible from a safety point of view for the chosen system in the Opalinus Clay in the siting area in the Zürcher Weinland. Specifically the data and the analyses show that:
 - the reference site has properties that ensure sufficient safety. The safety case provides arguments that the repository is safe: there is sufficient safety for a broad spectrum of cases and the spectrum of analysed cases is broad enough to cover all reasonable possibilities;
 - the system is robust; i.e. remaining uncertainties do not put safety in question;
 - the information basis for the wastes and the engineered barrier system is adequate and draws on more than 20 years of work in Switzerland and wide experience abroad.

In addition, as is extensively documented in the accompanying report on construction of facilities, the site properties and the design of the facility allow construction, operation and closure of the repository according to specifications, and thus to safety requirements.

The information basis for the site is sufficient and the site is sufficiently well understood to support these statements on safety and engineering feasibility. The third report, the geo-synthesis, illustrates that:

- the geometry and structure of the host rock and confining units are well characterised with state-of-the-art 3 D seismics to identify a sufficiently large undisturbed area for allocation of the repository;
 - the host rock and confining units, which have been characterised with the deep borehole at Benken, have favourable properties that ensure long-term safety;
 - relevant processes have been investigated in detail in the underground rock laboratory at Mont Terri and in the laboratory and confirm and complement the findings from the borehole at Benken, thus the properties of the site and host rock and their future evolution can be bounded with confidence based on information from an extensive regional geological programme and on the fact that the overall situation of the site is reasonably simple.
2. Project *Entsorgungsnachweis* provides a platform for discussion and a foundation for decision-making on how to proceed with the Swiss HLW programme and to assess the role of the Opalinus Clay of the Zürcher Weinland in this programme. The excellent results obtained from the geological investigations and from the safety assessment in Project *Entsorgungsnachweis* have led Nagra to put forward a proposal, for consideration by the Swiss Government, to focus future work for the waste management option "Disposal of SF /

HLW / ILW in Switzerland" on the Opalinus Clay of the Zürcher Weinland⁷. This is justified by the facts that:

- a systematic screening of potential sedimentary host rocks⁸ has indicated that Opalinus Clay has a number of particularly favourable properties, such as tightness, good retardation properties, a self-sealing capacity, good constructability, and good explorability;
- a systematic screening of situations⁸ has indicated that the Zürcher Weinland has a number of favourable properties, such as a low tectonic activity, presence of Opalinus Clay at a suitable depth and with sufficient lateral extent, and the existence of confining units with similar properties as the host rock itself;
- Project *Entsorgungsnachweis* clearly indicates that, for a reference system in the Opalinus Clay of the Zürcher Weinland
 - a high level of safety can be expected,
 - construction, operation and closure of the repository is feasible,
 - the site has good qualities and offers sufficient flexibility.

The positive results obtained for this host rock and region does not imply that a safe system could not be implemented in other regions where Opalinus Clay is present, or in other host rocks. However, the technical arguments (based on safety, geological simplicity and predictability) that led to this region being preferred are considered to be plausible and well founded.

3. There are still many steps to be taken before a repository is definitively sited in Switzerland, underground explorations are carried through, final designs are agreed upon, and licensing activities are undertaken. A formal siting decision, which will be a milestone within the general licence process, is expected around the year 2020 at the earliest. This means that ample time is available to continue the investigations and to iterate on the repository design. Therefore, the level of detail documented in Project *Entsorgungsnachweis* is considered to be adequate for the current phase of the programme and sufficient to support the conclusions that disposal of SF / HLW / ILW in Switzerland is feasible (Statement 1 above) and that the choice of the Zürcher Weinland as the focus for future work, with the Opalinus Clay as host rock, is justified (Statement 2 above).

⁷ Disposal abroad is an officially recognised option of the Swiss waste management strategy.

⁸ This step-wise approach that lasted several years was done in close interaction, and in agreement, with the authorities and their advisory committees and is documented in several reports (see Chapter 1).

Zusammenfassung

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Analyse und Beurteilung der Langzeitsicherheit eines geologischen Tiefenlagers⁹ für abgebrannte Brennelemente (BE), hochaktive verglaste Abfälle (HAA) aus der Wiederaufarbeitung abgebrannter Brennelemente und langlebige mittelaktive Abfälle (LMA) im Opalinuston des potenziellen Standortgebiets im Zürcher Weinland in der Nordostschweiz. Diese Sicherheitsanalyse ist integraler Bestandteil der technischen Dokumentation für das Projekt *Entsorgungsnachweis*¹⁰, die weiter eine Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungen und einen Bericht zur bautechnischen Machbarkeit umfasst. Das Projekt *Entsorgungsnachweis* ist ein wichtiger Meilenstein auf dem Weg zur Entsorgung der BE, HAA und LMA und beurteilt die grundsätzliche Machbarkeit der geologischen Tiefenlagerung dieser Abfälle in der Schweiz.

Die beiden Hauptziele des Projekts *Entsorgungsnachweis* sind:

1. Der Nachweis der grundsätzlichen Machbarkeit der geologischen Tiefenlagerung für BE, HAA und LMA im Opalinuston des potenziellen Standortgebiets im Zürcher Weinland. Damit sollen die 1988 durch den Bundesrat in seiner Beurteilung des *Projekts Gewähr 1985* definierten Auflagen erfüllt werden. Dieser Nachweis soll aufzeigen, dass
 - ein genügend ausgedehntes Gebiet mit geeigneten geologischen Eigenschaften für die Aufnahme eines geologischen Tiefenlagers vorhanden ist (Ausdehnung eines geeigneten Wirtgesteinskörpers, *Standortnachweis*),
 - der Bau, Betrieb und Verschluss eines geologischen Tiefenlagers in diesem Gebiet technisch machbar ist (*Nachweis der bautechnischen Machbarkeit*) und
 - die Langzeitsicherheit eines solchen Lagers gewährleistet ist (*Nachweis der Langzeitsicherheit*).
2. Die Bereitstellung von Diskussions- und Entscheidungsgrundlagen zur Festlegung des weiteren Vorgehens im Programm zur Entsorgung der BE / HAA / LMA der Schweiz. Diese umfassen eine übersichtliche Darstellung der wichtigsten Aussagen und Resultate sowie eine Diskussion der zugrunde liegenden wissenschaftlichen Basis. Die bei den geowissenschaftlichen Untersuchungen erzielten ausgezeichneten Resultate und das durchgeführte systematische Auswahlverfahren veranlassten die Nagra, dem Bundesrat vorzuschlagen, künftige Untersuchungen im Hinblick auf die geologische Tiefenlagerung der BE / HAA / LMA in der Schweiz auf den Opalinuston und das potenzielle Standortgebiet im Zürcher Weinland¹¹ zu fokussieren. Daher ist ein weiteres Ziel, Grundlagen für einen solchen Entscheid bereitzustellen. Der Antrag zur zukünftigen Fokussierung stützt sich auf ein aufwändiges und systematisches Auswahlverfahren ab, das in Absprache und im Konsens mit den zuständigen Behörden und deren Fachexperten durchgeführt wurde. Das schrittweise Vorgehen bei der Eingrenzung (i) von sieben potenziellen sedimentären Wirtgesteinsoptionen auf eine (Opalinuston) und (ii) von zwei ausgedehnten Untersuchungsgebieten innerhalb des Opalinustons auf das potenzielle Standortgebiet im Zürcher Weinland ist in verschiedenen veröffentlichten Nagra-Berichten dokumentiert und in einem Bericht der Aufsichtsbehörde zusammengefasst (siehe Kap. 1 des vorliegenden Berichts). Nach erfolg-

⁹ Der Begriff "geologisches Tiefenlager" wird im Entwurf des Kernenergiegesetzes definiert. Das geologische Tiefenlager wird nach dem Verschluss zum geologischen Endlager. Deshalb werden beide Begriffe verwendet.

¹⁰ Der deutsche Ausdruck wird auch in der englischen Fassung des vorliegenden Berichts verwendet. Auf Englisch lautet dieser Begriff "demonstration of disposal feasibility."

¹¹ Die Entsorgung im Ausland ist ebenfalls eine offiziell anerkannte Option in der Schweizer Entsorgungsstrategie.

ter Beurteilung des Projekts *Entsorgungsnachweis* durch die Behörden sollen der detaillierte Inhalt und Zeitplan künftiger Untersuchungen festgelegt werden.

Zusätzliche Zielsetzungen des Projekts sind:

3. Die Bereitstellung von Grundlagen für die Planung der Entsorgung (inklusive Kostenschätzungen), für die Bewertung alternativer Auslegungsvarianten und für die Beurteilung verschiedener Abfallströme (BE, HAA und verschiedene Typen von LMA) sowie für die Planung der zukünftigen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten.
4. Die Erarbeitung von Unterlagen für die Diskussion von Entsorgungsfragen mit allen Beteiligten und der Öffentlichkeit. Solche Diskussionen können zum besseren Verständnis der Entsorgung beitragen und so zu einer besseren Akzeptanz der geologischen Tiefenlagerung führen.

Die spezifischen Ziele der Sicherheitsanalyse (vorliegender Bericht) sind:

1. Beurteilung der Eignung des Opalinustons im Zürcher Weinland als mögliches Wirtgestein für ein Tiefenlager aus Sicht der Langzeitsicherheit.
2. Verbesserung des Kenntnisstands bzgl. der vielfältigen Sicherheitsfunktionen des betrachteten Lagersystems.
3. Bewertung der Robustheit des Lagersystems bzgl. der verbleibenden Ungewissheiten und der Auswirkung von Phänomenen, welche die Barrierenwirkung des Lagers beeinträchtigen könnten.
4. Bereitstellung einer Diskussionsgrundlage für eine Vielzahl von mit der Entsorgung zusammenhängenden Themen. Im Einzelnen bilden die in der Sicherheitsanalyse gemachten Aussagen zusammen mit den Stellungnahmen der zuständigen Behörden eine wichtige Grundlage im Hinblick auf die künftige Planung der Entsorgung.

Die Sicherheit während der Betriebsphase ist nicht Gegenstand dieses Berichts; sie wird qualitativ im Bericht über die bautechnische Machbarkeit abgehandelt.

Der vorliegende Bericht enthält die Argumente und Analysen, welche den Nachweis der Langzeitsicherheit eines Tiefenlagers für BE, HAA und LMA im Opalinuston des potenziellen Standortgebiets im Zürcher Weinland bilden. Der Begriff "Sicherheitsnachweis" wird nachfolgend umschrieben:

Sicherheitsnachweis

Der Sicherheitsnachweis besteht aus einer Reihe von Argumenten und Analysen, welche die Schlussfolgerung begründen, dass ein spezifisches Lagersystem sicher sein wird. Dazu gehört insbesondere der Nachweis, dass die behördlichen Schutzziele eingehalten werden. Der Sicherheitsnachweis und die dazu gehörenden Hintergrunddokumente beschreiben die Auslegung des Systems und seine Sicherheitsfunktionen und zeigen die Wirksamkeit der verschiedenen Barrieren und des Gesamtsystems auf. Die aufgeführten Argumente und Analysen werden begründet, und die Bedeutung von Ungewissheiten und offenen Fragen im Hinblick auf das weitere Vorgehen bei der Realisierung der Tiefenlagerung wird diskutiert.

Im Folgenden werden die wichtigsten Aspekte kurz vorgestellt.

Kapitel 1 hat als Einführungskapitel zum Ziel, den **vorliegenden Bericht in den nationalen Kontext**¹² zu stellen. Aus den fünf in der Schweiz in Betrieb stehenden Kernkraftwerken (das erste wurde 1969 in Betrieb genommen) und aus Medizin, Industrie und Forschung resultieren radioaktive Abfälle, deren zuverlässige Entsorgung sicherzustellen ist. Dazu wurde ein detailliertes Entsorgungskonzept entwickelt: Kürzlich wurde das zentrale Zwischenlager in Würenlingen in Betrieb genommen, womit heute eine genügende Kapazität für sämtliche aus der Schweiz stammenden radioaktiven Abfälle zu Verfügung steht, bis diese in ein geologisches Tiefenlager überführt werden können. Für die geologische Tiefenlagerung wurden zwei verschiedene Lager konzipiert (ein Lager für schwach- und mittelaktive Abfälle und ein weiteres für BE, HAA und LMA).

Die wichtigsten gesetzlichen Anforderungen an die Entsorgung lauten: (i) In der Schweiz anfallende radioaktive Abfälle sollen grundsätzlich in der Schweiz entsorgt werden (wobei die Gesetzgebung auch die Bedingungen definiert, unter denen für den Ausnahmefall einer Entsorgung im Ausland Exportbewilligungen erteilt werden) und (ii) in der Schweiz sind die Verursacher radioaktiver Abfälle gesetzlich zu deren sicheren Entsorgung verpflichtet. Um ihrer Verantwortung nachzukommen, gründeten die Elektrizitätsgesellschaften als Betreiber der Kernkraftwerke sowie die Schweizerische Eidgenossenschaft, die für die Entsorgung der aus der Medizin, Industrie und Forschung stammenden Abfälle verantwortlich ist, 1972 die Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra). Die Nagra ist verantwortlich für die Forschungs- und Projektierungsarbeiten im Zusammenhang mit der geologischen Tiefenlagerung. Weitere Aufgaben bei der Entsorgung der Abfälle, wie die Konditionierung, Zwischenlagerung sowie der Bau und Betrieb der verschiedenen benötigten Anlagen, liegen in der Verantwortung der einzelnen Verursacher oder Organisationen, die von den Verursachern hierzu gebildet werden. Die Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK) ist die Aufsichtsbehörde des Bundes. Die Eidgenössische Kommission für die Sicherheit von Kernanlagen (KSA) ist für die Beurteilung von Projekten zu Kernanlagen, einschliesslich der Lager für radioaktive Abfälle, verantwortlich. Sie erstellt auch Stellungnahmen zu Anträgen für die Erteilung von nuklearen Bewilligungen und zu Gutachten der HSK. In der Richtlinie R-21 der HSK und der KSA werden die Schutzziele für die Endlagerung radioaktiver Abfälle festgelegt. Ein wichtiges Ziel für jede Sicherheitsanalyse ist die Beurteilung, ob diese Schutzziele eingehalten werden können. In Kapitel 1 wird schliesslich das schrittweise Vorgehen zur Realisierung eines geologischen Tiefenlagers vorgestellt; dies schliesst eine kurze Diskussion der wichtigsten vergangenen und zukünftigen Schritte mit ein.

Kapitel 2 behandelt die **Vorgaben und Anforderungen für die Wahl und Auslegung des Lagersystems und für die Durchführung der Analysen der Langzeitsicherheit und die Bewertung deren Resultate**. Dazu werden die Anforderungen und Hinweise internationaler Organisationen und der Schweizer Gesetzgebung und behördlichen Richtlinien diskutiert. Dazu gehören insbesondere der Entwurf des neuen Kernenergiegesetzes (KEG)¹³ und die Richtlinie HSK-R-21. Das KEG legt die Entsorgung in einem geologischen Tiefenlager fest, das vor seinem endgültigen Verschluss für eine gewisse Zeit überwacht und kontrolliert werden kann. Diese Vorgabe basiert auf dem Konzept der "Kontrollierten Geologischen Langzeitlagerung", wie es von der vom Bund eingesetzten Expertenkommission EKRA¹⁴ vorgeschlagen wurde. Die

¹² Status: 31. August 2002. Die Auswirkungen des negativen Ausgangs der Abstimmung über die Erteilung einer Konzession für einen Sondierstollen des vorgeschlagenen Lagers für die Entsorgung von SMA am Wellenberg werden im vorliegenden Bericht nicht diskutiert.

¹³ Abkürzung für "Kernenergiegesetz" (in der englischen Version Nuclear Energy Law).

¹⁴ Abkürzung für "Expertengruppe Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle", vom Bundesrat im Juni 1999 eingesetzt.

in den verschiedenen Dokumenten enthaltenen Vorgaben und Hinweise werden ergänzt durch zusätzliche Überlegungen, die auf der Erfahrung der Nagra sowohl durch ihre Arbeiten in der Schweiz als auch durch ihre Zusammenarbeit mit internationalen Organisationen und Partnerorganisationen beruhen. Dazu gehört auch die Diskussion des Konzepts der Robustheit des Lagersystems und das Vorgehen bei der Sicherheitsanalyse. Weiter werden im Hinblick auf die Sicherheitsanalyse die Rolle und Behandlung der Biosphäre, die Behandlung von künftigen menschlichen Aktivitäten und der zu betrachtende Zeithorizont diskutiert. Die Informationen in diesem Kapitel stammen aus verschiedenen Quellen und sind relativ heterogen. Deshalb werden die Schlüsselaussagen wie folgt gruppiert: (i) Ziele der geologischen Tiefenlagerung, (ii) Vorgaben für die Wahl eines geeigneten Lagersystems (einschliesslich Diskussion der *Sicherheitsfunktionen* des Lagersystems), (iii) Ziele und Vorgaben für eine schrittweise Realisierung, (iv) Anforderungen an die Sicherheitsanalyse. Aufgrund ihrer zentralen Bedeutung werden die Sicherheitsfunktionen nachfolgend aufgelistet und beschrieben.

Sicherheitsfunktionen

Das Lagersystem erfüllt verschiedene Funktionen, die für die Langzeitsicherheit relevant sind. Diese werden als Sicherheitsfunktionen bezeichnet und umfassen:

- Isolation vom menschlichen Lebensraum – Die Sicherheit für Mensch und Umwelt wird durch den Einschluss der radioaktiven Abfälle und des spaltbaren Materials in einem geologischen Tiefenlager gewährleistet. Nach Verfüllung und Versiegelung der Zugänge ist die Wahrscheinlichkeit eines unerwünschten menschlichen Eindringens und einer unerlaubten Verwendung des spaltbaren Materials sehr klein. Die Wahrscheinlichkeit des unabsichtlichen menschlichen Eindringens (z.B. Anbohren) reduziert sich durch die Wahl eines Lagergebietes, in dem aus heutiger Sicht keine wirtschaftlich nutzbaren Ressourcen vorhanden sind und keine Nutzungskonflikte bestehen. Schliesslich gewährleistet eine sorgfältige Standortwahl, dass keine für die Langzeitstabilität ungünstigen geologischen Ereignisse und ungünstig verlaufenden Prozesse zu erwarten sind.
- Langzeiteinschluss und radioaktiver Zerfall innerhalb des Lagersystems – Ein Grossteil der anfänglich vorhandenen Radioaktivität wird durch radioaktiven Zerfall abgebaut, während die Abfälle noch vollständig in den Abfallbehältern eingeschlossen sind. Dies gilt vor allem für BE und HAA, deren Stahlbehälter während mindestens 10'000 Jahren einen vollständigen Einschluss gewährleisten. Selbst nach späterem Versagen der Behälter sorgen die Langzeitstabilität der BE- und HAA-Abfallmatrizen, die äusserst geringe Grundwasserbewegung und eine Reihe geochemischer Immobilisierungs- und Rückhalteprozesse dafür, dass die Radionuklide weitgehend innerhalb des Systems der Sicherheitsbarrieren und des unmittelbar umgebenden Gesteins eingeschlossen bleiben und dort zerfallen.
- Verminderung der Freisetzung in die Umwelt – Obwohl ein vollständiger Einschluss nicht über die gesamte relevante Zeit und für sämtliche Radionuklide aufrechterhalten werden kann, sind die Freisetzungsraten von Radionukliden aus den Abfällen gering. Dies gilt insbesondere für die BE und HAA mit ihren stabilen Abfallmatrizen. Zudem verzögert bzw. vermindert eine Reihe von Prozessen die Freisetzung und den Transport der Radionuklide und begrenzt damit die Radionuklidkonzentration in der Umwelt. Dazu gehört auch der radioaktive Zerfall während des langsamen Transports durch die technischen und geologischen Barrieren.

Kapitel 3 beschreibt die für die Sicherheitsanalyse verwendete Methode, welche die in Kapitel 2 aufgelisteten Anforderungen berücksichtigt. Schlüsselaspekte sind: (i) die Beschreibung der einzelnen Schritte der Sicherheitsanalyse und (ii) die Festlegung der wichtigsten Themen, die für den Nachweis der Sicherheit zu behandeln sind. Die verschiedenen Aspekte werden nachstehend näher ausgeführt.

(i) Der Sicherheitsnachweis umfasst:

- Die Auswahl bzw. Festlegung des Lagersystems unter Berücksichtigung einer flexiblen Realisierungsstrategie. Dabei werden die Ergebnisse früherer Studien, inkl. Studien zur Langzeitsicherheit, berücksichtigt.
- Die Beschreibung des Systems (das sogenannte Systemkonzept) gemäss dem gegenwärtigen Kenntnisstand der Eigenschaften, Ereignisse und Prozesse ("features, events and processes", sog. FEPs), die das Lagersystem und dessen Entwicklung charakterisieren und möglicherweise beeinflussen können.
- Die Ableitung des Sicherheitskonzepts, das sich auf gut verstandene und wirksame Prozesse abstützt (die sogenannten Pfeiler der Sicherheit).
- Das Aufzeigen der möglichen radiologischen Konsequenzen des Lagersystems durch Auswahl und Analyse einer grossen Zahl und eines breiten, abdeckenden Spektrums von Rechenfällen.
- Die Zusammenstellung der wissenschaftlich belegten Argumente und Analysen, die den Sicherheitsnachweis bilden, sowie Hinweise für die künftigen Phasen des Entsorgungsprogramms.

(ii) Die Argumente, die zum Sicherheitsnachweis beitragen, betreffen :

- Die Eignung der geologischen Tiefenlagerung als Entsorgungsoption,
- die Sicherheit und Robustheit des gewählten Lagersystems,
- die geringe Wahrscheinlichkeit und die beschränkten Folgen eines menschlichen Eindringens,
- die Vorteile der schrittweisen Realisierung eines solchen Lagers,
- die für das gewählte Lagersystem und dessen Entwicklung vorhandenen guten wissenschaftlichen Kenntnisse,
- die Eignung der zur Verfügung stehenden Methode und der Modelle und Datensätze zur Beurteilung der Langzeitsicherheit und
- die breit abgestützte Begründung der Sicherheit, d.h. das Einhalten der behördlichen Schutzziele, die Resultate aus der Verwendung alternativer Sicherheitsindikatoren, das Bestehen von Sicherheitsreserven (Reserve-FEPs) und das Fehlen von offenen Fragen, welche die Sicherheit grundsätzlich in Frage stellen könnten.

Kapitel 4 dokumentiert den gegenwärtigen Kenntnisstand und die Charakterisierung des potenziellen Lagersystems im Opalinuston des Zürcher Weinlands direkt nach Verschluss des Tiefenlagers. Die Wahl des potenziellen Standorts und die Auslegung des Lagersystems erfolgt entsprechend den Zielsetzungen, Anforderungen und Hinweisen, wie sie in Kapitel 2 vorgestellt wurden. Dabei werden folgende Elemente diskutiert: (i) Schlüsselmerkmale des Standorts, (ii) Schlüsseigenschaften des Wirtgesteins Opalinuston, (iii) die Auslegung des Lagers, (iv) die einzulagernden Abfallmengen und die Abfalleigenschaften (BE, HAA und

LMA), (v) das System der technischen Barrieren und deren Auslegung. Diese Elemente werden nachstehend detaillierter beschrieben:

(i) Schlüsselmerkmale des Standorts

- Die geologische Umgebung ist einfach; die strukturellen, hydrogeologischen und geochemischen Eigenschaften sind gut vorhersagbar.
- Das potenzielle Standortgebiet ist tektonisch stabil mit einer geringen Hebungs- und dadurch bedingten Erosionsrate.
- Sowohl das Kristallin als auch die überlagernden Sedimente in dieser Region haben kein bedeutendes Potential an natürlichen Rohstoffen.

(ii) Schlüsseleigenschaften des Wirtgesteins Opalinuston

- Der Opalinuston weist eine derart niedrige hydraulische Durchlässigkeit auf, dass der Transport gelöster Stoffe durch die Formation hauptsächlich durch Diffusion und nur untergeordnet durch Advektion erfolgt.
- Die geochemischen Bedingungen im Opalinuston sind reduzierend, leicht alkalisch und mässig salin und begünstigen sowohl die langfristige Wirksamkeit der technischen Barrieren als auch die Radionuklidrückhaltung.
- Es wird erwartet, dass die geochemischen Bedingungen im Opalinuston und in den Rahmgesteinen über den Zeitraum von einigen Millionen Jahre stabil bleiben¹⁵.
- Die Eigenschaften des Opalinustons, insbesondere sein ausgeprägtes Selbstabdichtungsvermögen, gewährleisten, dass die durch den Lagerbau induzierten Klüfte (Auflockerungszone) sowie natürliche Störungszonen und Klüfte hydraulisch sehr gering durchlässig sind, d.h. deren Auswirkung auf die hydraulischen Eigenschaften des Wirtgesteins vernachlässigbar sein wird.
- Beim Opalinuston handelt es sich um ein verfestigtes Tonsediment mit günstigen bautechnischen Eigenschaften, die den Bau von Stollen mit kleinen Durchmessern ohne Ausbau und von grösseren Tunneln (mit Ausbau) in einer Tiefe von mehreren Hundert Metern ermöglichen.

(iii) Schlüsselmerkmale der Lagerauslegung sind:

- eine Zugangsrampe, Bau- und Betriebstunnel, zentrale Empfangsanlagen und ein Bau-/Ventilationsschacht,
- die Anordnung paralleler subhorizontaler Lagerstollen für BE / HAA mit einem Durchmesser von 2.5 m und einem Stollenabstand von 40 m,
- drei kurze horizontale Lagertunnel für LMA einige hundert Meter entfernt vom BE / HAA-Bereich des Lagers und
- Pilot- und Testlager entsprechend dem EKRA-Konzept.

(iv) Schlüsselaspekte bezüglich der Abfälle

- Die angenommenen Abfallmengen basieren auf der Annahme einer 60-jährigen Betriebsdauer der fünf gegenwärtig in Betrieb stehenden Kernkraftwerke; dies entspricht einer Stromproduktion von insgesamt 192 GWa(e).

¹⁵ In diesem Zeitraum wird lediglich eine geringfügige Salinitätsabnahme erwartet.

- Die Menge an BE und HAA/LMA basiert auf der Annahme, dass lediglich diejenige Menge an BE aufgearbeitet wird, für die heute Wiederaufarbeitungsverträge bestehen (ca. 1195 t_{HM}).
 - Dies führt zu ca. 3200 t_{HM} BE bzw. 2065 BE-Behältern, 730 HAA-Behältern und ca. 7300 m^3 (konditionierten) LMA.
- (v) Schlüsselmerkmale des Systems der technischen Barrieren sind:
- der BE-Behälter – beim Referenzkonzept handelt es sich um einen Stahlbehälter mit entweder 4 DWR- oder 9 SWR-Brennelementen, mit einer Mindestwandstärke von 15 cm, einer Länge von ca. 5 m und einem Durchmesser von ca. 1 m,
 - der HAA-Behälter – das Referenzkonzept ist dasselbe, wie in der Projektstudie *Gewähr* dokumentiert, d.h. ein Stahlbehälter, der eine Edelstahlkokille mit verglastem HAA enthält, mit einer Wandstärke von 25 cm, einer Länge von ca. 2 m und einem Durchmesser von ca. 1 m,
 - die LMA-Behälter – die LMA-Gebinde werden in Lagercontainer aus Beton verpackt, und die Zwischenräume zwischen den Gebinden werden mit Zementmörtel verfüllt,
 - die Verfüllung der BE / HAA-Lagerstollen – die BE / HAA-Behälter werden auf kompaktierten Bentonitblöcken entlang der Stollenlängsachse platziert, mit einem Abstand von 3 m zwischen den Behältern; der Raum um die Behälter wird mit Bentonitgranulat verfüllt,
 - die Verfüllung der LMA-Kavernen – nach Einlagerung der LMA-Lagercontainer in die LMA-Lagertunnel werden die Hohlräume zwischen den Lagercontainern mit Zementmörtel verfüllt und
 - die Verfüllung und Versiegelung (Bau- und Betriebstunnel, Zentralbereich, Rampe) – die Bau- und Betriebstunnel, der zentrale Bereich und die Rampe (im Bereich des Wirtgesteins) werden mit einem Bentonit-Sand-Gemisch verfüllt, mit an mehreren Orten vorgesehenen Versiegelungsstrecken aus hochkompaktiertem Bentonit; auch der Schacht wird mit hochkompaktiertem Bentonit verfüllt.

Kapitel 5 enthält eine **Beschreibung der zeitlichen Entwicklung des Lagersystems** nach Verschluss des Lagers. Dabei werden die Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Systemkomponenten berücksichtigt, und die Entwicklung des Standorts und der technischen Barrieren diskutiert. Neben der erwarteten Entwicklung des Lagersystems werden auch mögliche Abweichungen davon diskutiert. Dies bildet die Basis für die Ableitung einer Reihe von zu betrachtenden Fällen, die in dem vorliegenden Bericht im Detail quantitativ analysiert werden.

Kapitel 6 analysiert **die relative Bedeutung der verschiedenen Eigenschaften und Prozesse** des Lagersystems und **identifiziert die quantitativ zu analysierenden Fälle**. Dazu werden sowohl deterministische als auch probabilistische Sensitivitätsanalysen durchgeführt und die Effekte möglicher Abweichungen von der erwarteten Entwicklung untersucht, ausgehend von den *Sicherheitsfunktionen*, wie sie in Kapitel 2 definiert wurden. Anhand einer qualitativen Diskussion und dem aus den quantitativen Analysen gewonnenen Verständnis werden die Schlüsselmerkmale und -phänomene identifiziert, die zu den Sicherheitsfunktionen beitragen; diese werden als *Pfeiler der Sicherheit* bezeichnet. Aufgrund der wichtigen Rolle der Pfeiler der Sicherheit für den Sicherheitsnachweis werden sie nachstehend aufgelistet und definiert:

Pfeiler der Sicherheit

Die Pfeiler der Sicherheit sind Eigenschaften des Lagersystems, die eine Schlüsselrolle für die Gewährleistung der *Sicherheitsfunktionen* übernehmen:

- **Die Platzierung des Lagers im tiefen Untergrund**, in einem Umfeld, das menschliches Eindringen sehr unwahrscheinlich macht und das keinen die Langzeitstabilität gefährdenden geologischen Ereignissen und ungünstigen Prozessen ausgesetzt ist.
- **Das Wirtgestein**, das eine sehr geringe hydraulische Durchlässigkeit, eine homogene Porenstruktur und ein Selbstabdichtungsvermögen aufweist und somit eine wirkungsvolle Barriere gegenüber dem Radionuklid-Transport darstellt und eine geeignete Umgebung für das System der technischen Barrieren bildet.
- **Ein chemisches Umfeld**, das für eine Reihe von geochemischen Immobilisierungs- und Rückhaltungsprozessen günstig ist, das die Langzeitstabilität der technischen Barrieren begünstigt, und das seinerseits aufgrund einer Reihe von chemischen Pufferreaktionen langfristig stabil ist.
- **Die Bentonitverfüllung (für BE und HAA)** als gut definiertes Interface zwischen den Abfallbehältern und dem Wirtgestein, mit ähnlichen Eigenschaften wie das Wirtgestein. Die Bentonitverfüllung gewährleistet, dass die Auswirkungen der Lagerstollen und des wärmeproduzierenden Abfalls auf das Wirtgestein minimal sind. Sie bildet eine wirkungsvolle Transportbarriere für Radionuklide sowie eine geeignete Umgebung zur Gewährleistung eines günstigen Langzeitverhaltens der Behälter und der Abfallmatrizen.
- **Die BE- und HAA-Abfallmatrizen**, die unter den erwarteten Bedingungen sehr stabil sind.
- **Die BE- und HAA-Behälter**, die unter den erwarteten Bedingungen mechanisch stabil und korrosionsresistent sind und die für einen beträchtlichen Zeitraum einen absoluten Einschluss der Abfälle gewährleisten.

Um die Rechenfälle für die quantitative Sicherheitsanalyse zu identifizieren, wird angenommen, dass die Pfeiler der Sicherheit wie erwartet funktionieren, dass aber auch Abweichungen möglich sind (basierend auf den Ausführungen in Kapitel 4 und 5 und aufgrund der Erkenntnisse aus den Sensitivitätsanalysen).

Kapitel 7 erläutert die **Ergebnisse der quantitativen Analyse der in Kapitel 6 identifizierten Fälle**. Zuerst werden die betrachteten Fälle konzeptuell beschrieben. Dabei werden für ein bestimmtes Szenarium verschiedene Konzeptualisierungen betrachtet, und für eine bestimmte Konzeptualisierung werden Ungewissheiten in den Daten durch Parametervariationen berücksichtigt. Ausgangspunkt der Analysen ist das Referenzszenarium, welches ein Lagersystem annimmt, das sich entsprechend den Erwartungen verhält. Die Auswirkungen von Ungewissheiten im Verhalten und in der zukünftigen Entwicklung des Systems werden anhand von alternativen Szenarien untersucht.

Um die Robustheit des Lagersystems zu testen, wurde eine Reihe von "*what if?*"-Fällen untersucht, wobei Phänomene unterstellt bzw. Parameterwerte angenommen werden, die außerhalb des Bereichs liegen, der aufgrund wissenschaftlicher Ergebnisse als möglich erachtet wird. Hier geht es also nicht darum, real denkbare Fälle zu analysieren, sondern einen vertieften Einblick in die Qualität des Lagersystems zu erhalten. Um die Zahl der "*what if?*"-Fälle einzuschränken, werden nur solche betrachtet, welche die Schlüsseleigenschaften der Pfeiler der

Sicherheit beeinträchtigen würden. Die Liste der "*what if?*"-Fälle ist nicht umfassend; trotzdem illustriert sie, dass das System selbst unter Extrembedingungen noch sicher ist.

Verschiedene Auslegungs- und Systemoptionen für den Bau des Lagers werden separat evaluiert. Die Sensitivität des Verhaltens von Radionukliden in der Biosphäre und die resultierenden Dosen werden durch eine Anzahl von Fällen untersucht, die sich aus alternativen geomorphologischen und klimatischen Bedingungen ableiten lassen. Das Spektrum möglicher Dosen wird anhand verschiedener (modellhafter) zukünftig denkbarer Eigenschaften des Lebensraums an der Erdoberfläche illustriert.

Kapitel 8 umfasst die **Synthese der wichtigsten Argumente und Resultate der Sicherheitsanalyse** und bildet den letzten Schritt des Sicherheitsnachweises. Alle Aspekte der in Kapitel 3 als wichtig identifizierten Argumente werden rekapituliert und die Feststellungen im Einzelnen zusammengefasst:

- Die Eignung der geologischen Tiefenlagerung als Entsorgungsoption wird begründet (i) durch die weltweit anerkannte Auffassung, dass ein sorgfältig gewähltes Lagersystem an einem günstigen Standort jetzt und in Zukunft Sicherheit und Schutz von Menschen und Umwelt gewährleistet und auch einen guten Schutz gegen unbefugte menschliche Eingriffe bietet, (ii) durch in der Schweiz und anderswo vorhandene geeignete Gesteinsformationen, (iii) durch die Resultate vieler weltweit durchgeführter Sicherheitsanalysen, (iv) durch Beobachtungen an natürlichen Systemen (natürliche Analoga) und (v) durch die Vorteile der geologischen Tiefenlagerung gegenüber anderen Optionen.
- Die Sicherheit und Robustheit des Lagersystems wird gewährleistet (i) durch eine Reihe wirksamer passiver Barrieren, welche mit verschiedenen Phänomenen zu Einschluss und Rückhaltung der Radionuklide beitragen, (ii) durch die Vermeidung von Ungewissheiten und ungünstigen Phänomenen mit der Wahl eines geeigneten Standorts und einer geeigneten Lagerauslegung und (iii) durch die Langzeitstabilität des Lagersystems in einer günstigen geologischen Situation.
- Die kleine Wahrscheinlichkeit und die mässigen Auswirkungen eines menschlichen Eindringens sind bedingt (i) durch die Archivierung von Informationen über das Tiefenlager, (ii) durch die Vermeidung von möglichen Rohstoffkonflikten durch die Standortwahl (d.h. das Fehlen nutzbarer natürlicher Ressourcen im vorgeschlagenen Lagergebiet) und (iii) durch die Bildung von Kompartimenten für die einzelnen BE-/HAA-Behälter (vollständige Umhüllung der Behälter mit Bentonit) und die Verfestigung der Abfälle.
- Die Realisierung eines geologischen Tiefenlagers erfolgt schrittweise, d.h. (i) dass in der gegenwärtigen Phase das System noch nicht in allen Details festgelegt werden muss (und deshalb noch nicht alle Fragen im Detail beantwortet sein müssen); (ii) dass sich aber der vorliegende Sicherheitsnachweis auf bereits heute gut verstandene und zuverlässig charakterisierte Komponenten (Standort, System der technischen Barrieren) abstützen kann, (iii) dass die Beteiligten einbezogen werden können und damit die Möglichkeit besteht, Anregungen und Verbesserungsvorschläge Dritter zu berücksichtigen, (iv) dass das Projekt die Flexibilität hat, neue Resultate und Wünsche zu berücksichtigen (z.B. bezüglich der detaillierten Anordnung der Lagerstollen, der Wahl zwischen verschiedenen Auslegungsoptionen, der Platzierung der Aussenanlagen und sogar bezüglich der Standortwahl; d.h. es existieren alternative Standortmöglichkeiten sowohl für die Wirtgesteinsoption Opalinuston als auch für andere Wirtgesteinsoptionen) und (v) dass Möglichkeiten zur Überwachung bestehen und gegebenenfalls Entscheidungen rückgängig gemacht werden können (im Extremfall die Rückholung der Abfälle).

- Der für das gewählte Lagersystem gute wissenschaftliche Kenntnisstand ist begründet (i) durch die guten und belastbaren Ergebnisse der regionalen und lokalen Felduntersuchungen, die als wichtigste Elemente die 3 D-Seismik und die Sondierbohrung Benken im potenziellen Standortgebiet sowie die Informationen aus weiteren Bohrungen in der näheren und weiteren Umgebung beinhalten; durch die Experimente im Felslabor Mont Terri und im Labor sowie durch Beobachtungen am Opalinuston in einer Reihe von Eisenbahn- und Strassentunneln, (ii) durch die Resultate und Erfahrungen aus mehr als 20 Jahren Entwicklung und Charakterisierung von Komponenten der technischen Barrieren in der Schweiz sowie durch die zur Verfügung stehende weltweite Informationsbasis und (iii) durch das vorhandene detaillierte modellhafte Inventar für BE, HAA und LMA.
- Methodik, Modelle, Rechencodes und Datensätze für die Analyse eines breiten Spektrums von Fällen haben sich bewährt und erfüllen die Anforderungen, die in Kapitel 2 vorgegeben wurden.
- Die behördlichen Vorgaben werden erfüllt: (i) in allen betrachteten Fällen liegen die Dosis-maxima unterhalb des festgelegten Schutzzieles, in den meisten Fällen um einige Grössenordnungen; (ii) das vorgeschlagene Tiefenlager kann während der möglicherweise länger dauernden Beobachtungs- und Überwachungsphase jederzeit innerhalb weniger Jahre verschlossen werden, und die Sicherheit hängt nach Verschluss des Lagers nicht von weiteren Massnahmen ab und (iii) mit der vorgeschlagenen Lagerauslegung wurde das EKRA-Konzept der "Kontrollierten Geologischen Langzeitlagerung" umgesetzt.
- Die Verwendung alternativer Sicherheitsindikatoren umfasst zusätzlich zu Dosis- und Risikoabschätzung (i) einen Vergleich der Radiotoxizität der Abfälle als Funktion der Zeit mit der Radiotoxizität natürlicher Materialien, (ii) einen Vergleich potentieller Radiotoxizitätsflüsse aus dem Tiefenlager mit natürlichen Radiotoxizitätsflüssen in der Umwelt, (iii) einen Vergleich potentieller Radiotoxizitätskonzentrationen am oberen Rand des Opalinustons (von aus dem Tiefenlager stammenden Radionukliden) mit der natürlichen Radiotoxizitätskonzentration im Opalinuston und (iv) die Evaluation der Verteilung der Radiotoxizität in den verschiedenen Systemkomponenten als Funktion der Zeit.
- Einige positiv zur Sicherheit beitragende Phänomene (sog. Reserve-FEPs) wurden in den durchgeführten Analysen nicht berücksichtigt, da zur Zeit keine geeigneten Modelle zur Verfügung standen um sie quantitativ zu analysieren. Sie sind zusätzliche Argumente für die Sicherheit. Es sind dies: (i) die Mitfällung von Radionukliden mit sekundären Korrosionsprodukten der BE, HAA-Gläser und der Behälter (mit Ausnahme der Mitfällung von Radium, die in allen betrachteten Fällen enthalten ist), (ii) die Sorption von Radionukliden an Korrosionsprodukten der Behälter, (iii) die Konzentrationen natürlicher Isotope in der Porenwasserlösung von Bentonit, welche die effektive Löslichkeit einiger Radionuklide weiter vermindern könnten, (iv) die irreversible Sorption von Radionukliden im Nahfeld oder in der Geosphäre (Oberflächenmineralisation), (v) die Langzeit-Immobilisierungsprozesse in der Geosphäre (Ausfällung / Mitfällung), (vi) die verzögerte Freisetzung von Radionukliden aufgrund der niedrigen Korrosionsrate von metallischem LMA-Material (z.B. Hülsen und Endstücke) sowie eine Zeitspanne vollständigen Einschlusses durch LMA-Gebinde und -Lagerbehälter und (vii) die lange Wiederaufsättigungszeit des Lagers und seiner Umgebung, die den Beginn von Korrosions- und Auflösungsprozessen verzögert.
- Durch die vereinfachte konservative oder pessimistische Darstellung des Systems bei einigen der analysierten Fälle werden die berechneten Dosen überschätzt. Damit sind in diesen Fällen weitere Sicherheitsreserven vorhanden.
- Trotz der detaillierten Analyse eines grossen Spektrums von Fällen, welches sorgfältig und systematisch abgeleitet wurde, wurden keine ungeklärten Fragen identifiziert, welche die Sicherheit grundsätzlich in Frage stellen könnten.

Kapitel 9 beinhaltet die **Schlussfolgerungen**:

1. Das Projekt *Entsorgungsnachweis* erfüllt den Auftrag des schweizerischen Bundesrats für einen überzeugenden Standortnachweis, welchen er in seiner Entscheidung zum damaligen Projekt Gewähr gegeben hat. Die im vorliegenden Bericht dokumentierten Arbeiten zeigen, dass das gewählte Lagersystem im Opalinuston im potenziellen Standortgebiet des Zürcher Weinlands langfristige Sicherheit bietet. Die Resultate und Analysen belegen nachvollziehbar, dass:
 - der Referenzstandort Eigenschaften aufweist, welche die Sicherheit gewährleisten: Für ein breites Spektrum von Rechenfällen ist die Sicherheit gegeben und das Spektrum der analysierten Fälle wurde genügend breit gewählt, um alle realistischerweise anzunehmenden Möglichkeiten abzudecken;
 - das System robust ist, d.h. dass die verbleibenden Ungewissheiten die Sicherheit nicht in Frage stellen können;
 - die Informationsbasis bezüglich der Abfälle und dem System der technischen Barrieren gut ist. Sie stützt sich auf mehr als 20 Jahre wissenschaftliche Untersuchungen in der Schweiz und grosse internationale Erfahrung.

Wie im Bericht zur bautechnischen Machbarkeit ausführlich dokumentiert wurde, erlauben die Standorteigenschaften und die Auslegung der Anlage den zuverlässigen und sicheren Bau, Betrieb und Verschluss des Lagers entsprechend den Vorgaben.

Die Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungen zeigt, dass:

- die Geometrie und Struktur des Wirtgesteins und der Rahmengesteine durch die 3 D-Seismik gut und zuverlässig charakterisiert sind und dass ein ausreichend grosses ungestörtes Gebiet für die Erstellung eines Tiefenlagers vorhanden ist;
 - das Wirtgestein und die Rahmengesteine günstige Eigenschaften aufweisen, welche die Langzeitsicherheit gewährleisten;
 - die relevanten Prozesse im Detail im Felslabor Mont Terri und im Labor untersucht werden konnten und die Ergebnisse aus der Sondierbohrung Benken damit im Einklang stehen. Die Eigenschaften des Standorts und des Wirtgesteins sind gut bekannt. Die zukünftige Entwicklung kann aufgrund der Resultate des umfangreichen regionalen geowissenschaftlichen Untersuchungsprogramms genügend genau eingegrenzt werden, nicht zuletzt da der geologische Aufbau des potenziellen Standortgebiets vergleichsweise einfach ist.
2. Das Projekt *Entsorgungsnachweis* liefert wichtige Diskussions- und Entscheidungsgrundlagen für die Festlegung des zukünftigen Vorgehens im Programm zur Entsorgung der BE / HAA / LMA und für die Bewertung des potenziellen Wirtgesteins Opalinuston im Zürcher Weinland. Gestützt auf die ausgezeichneten Ergebnisse der geowissenschaftlichen Untersuchungen und die Resultate der Sicherheitsanalysen schlägt die Nagra dem Bundesrat vor, die zukünftigen Arbeiten für die Option "Entsorgung von BE / HAA / LMA in der Schweiz" auf den Opalinuston im Zürcher Weinland¹⁶ zu fokussieren. Dies wird wie folgt begründet:

¹⁶ Eine Entsorgung im Ausland ist eine offiziell anerkannte Option im Schweizer Entsorgungsprogramm.

- In der Schweiz wurden im Verlaufe des systematischen Einengungsverfahrens verschiedene potenzielle sedimentäre Wirtgesteine¹⁷ betrachtet. Der Opalinuston weist eine Reihe besonders günstiger Eigenschaften auf: sehr geringe Durchlässigkeit, gute Rückhalteigenschaften, gutes Selbstabdichtungsvermögen, vernünftige Baueigenschaften und gute Explorierbarkeit.
- Die systematische Einengung möglicher Standortgebiete¹⁷ hat ergeben, dass das Zürcher Weinland eine Reihe günstiger Eigenschaften aufweist, wie geringe seismotektonische Aktivität, geeignete Tiefenlage des Opalinustons mit ausreichender ungestörter lateraler Ausdehnung sowie Rahmengesteine mit ähnlichen guten Eigenschaften wie das Wirtgestein selbst.
- Das Projekt *Entsorgungsnachweis* zeigt, dass für das Referenzsystem im Opalinuston im Zürcher Weinland:
 - ein hohes Mass an Sicherheit erwartet werden kann,
 - Bau, Betrieb und Verschluss des Lagers zuverlässig machbar sind und
 - das geeignete Standortgebiet eine genügende Ausdehnung aufweist.

Diese Folgerungen schliessen nicht aus, dass in anderen Gebieten auch ein sicheres Lager erstellt werden könnte, sei dies in anderen Gebieten mit Opalinuston oder in anderen Wirtgesteinen. Die Argumente, die zum Vorschlag der Fokussierung der zukünftigen Arbeiten auf den Opalinuston im potentiellen Standortgebiet des Zürcher Weinlands führten, sind aber aus Sicht der Nagra gut begründet.

3. Bevor ein geologisches Tiefenlager in der Schweiz realisiert werden kann, sind noch weitere Arbeiten nötig. Beispielsweise müssen die geologischen Untersuchungen vertieft, die endgültige Lagerauslegung festgelegt sowie verschiedene Bewilligungsverfahren durchlaufen werden. Ein formeller Entscheid über die Standortwahl wird als Teil des Rahmenbewilligungsverfahrens nicht vor dem Jahr 2020 erwartet. Damit steht genügend Zeit zur Verfügung, um die Untersuchungen fortzuführen und die endgültige Lagerauslegung umsichtig festzulegen. Der Detaillierungsgrad, welcher dem Projekt *Entsorgungsnachweis* zu Grunde liegt, erfüllt die Anforderungen der heutigen Phase des Entsorgungsprogramms und ist eine gute Basis für den Nachweis der sicheren Entsorgung von BE / HAA / LMA in der Schweiz (Aussage 1 oben) und für die Fokussierung künftiger Arbeiten auf das Wirtgestein Opalinuston und das potenzielle Standortgebiet im Zürcher Weinland (Aussage 2 oben).

¹⁷ Dieses schrittweise Vorgehen dauerte mehrere Jahre, wurde in enger Zusammenarbeit und in Übereinstimmung mit den Behörden und deren Beratungskommissionen durchgeführt und ist in verschiedenen Berichten dokumentiert.

Exposé de synthèse

Ce rapport décrit l'analyse et l'évaluation de la sûreté radiologique à long terme d'un dépôt souterrain en profondeur¹⁸, situé dans les Argiles à Opalinus du "Weinland zurichois" (Zürcher Weinland) dans le nord de la Suisse et destiné aux assemblages combustibles usés (AC), aux déchets de haute activité vitrifiés (DHA) issus du retraitement des assemblages combustibles, ainsi qu'aux déchets de moyenne activité à vie longue (DMAL). Cette analyse de la sûreté a été réalisée dans le cadre de l'étude de faisabilité intitulée *Entsorgungsnachweis*¹⁹, qui comprend également une synthèse des résultats des études géologiques effectuées dans les Argiles à Opalinus, ainsi qu'un rapport concernant la faisabilité technique de la construction du dépôt. Le projet *Entsorgungsnachweis* constitue une phase essentielle du programme de gestion des AC, DHA et DMAL en Suisse, puisqu'il évalue la faisabilité du stockage géologique pour ce type de déchets. C'est également une étape importante vers la réalisation du dépôt.

Le projet *Entsorgungsnachweis* a deux objectifs principaux:

1. Démontrer que les AC / DHA / DMAL peuvent être stockés de manière sûre dans les Argiles à Opalinus du Weinland zurichois et remplir ainsi les exigences posées en 1988 par le Conseil fédéral dans l'arrêté concernant le projet *Garantie 1985*. Ces exigences sont les suivantes:
 - Démonstration de l'existence d'un site: prouver qu'il existe en Suisse un ou plusieurs sites adaptés au stockage des déchets du point de vue géologique (une formation d'accueil d'une étendue suffisante) et hydrogéologique.
 - Démonstration de la faisabilité technique: prouver qu'il est possible, dans l'état actuel des connaissances techniques, de construire, d'exploiter et de sceller un dépôt implanté sur un tel site.
 - Démonstration de la sûreté: prouver que la sûreté à long terme d'un tel dépôt est garantie.
2. Fournir une base de discussion et de décision pour la suite du programme de gestion des déchets de haute activité en Suisse, en présentant les principales conclusions et les bases scientifiques sur lesquels reposent les recherches. Les études géologiques sur les Argiles à Opalinus du secteur d'accueil potentiel dans le Weinland zurichois, réalisées à l'issue d'une procédure de sélection systématique, ont fourni d'excellents résultats et conduit la Nagra à proposer au Conseil fédéral de concentrer ses activités futures sur cette roche et ce secteur, dans le cadre de l'option de gestion des déchets "Stockage des AC / DHA / DMAL en Suisse"²⁰. Le projet *Entsorgungsnachweis* doit par conséquent fournir des arguments étayant cette proposition, qui constitue l'aboutissement d'une procédure de sélection longue et systématique, élaborée en étroite collaboration avec les autorités de contrôle et les experts mandatés par la Confédération. Une approche progressive a permis de passer (i) pour la formation d'accueil potentielle, de sept roches sédimentaires à une seule (les Argiles à Opalinus) et (ii) pour les sites envisagés dans les Argiles à Opalinus, de deux grandes régions de prospection à un secteur potentiel pour l'établissement d'un dépôt dans le Weinland zurichois. Ce processus de sélection, qui a fait l'objet de plusieurs rapports rédigés par la Nagra, est également résumé dans un document émanant de l'autorité de

¹⁸ La notion de "dépôt souterrain en profondeur" est définie dans le projet de loi sur l'énergie nucléaire. Après sa fermeture, le dépôt souterrain devient un "dépôt final". Dans le texte qui suit, le terme de "dépôt" fait toujours référence à ce type d'infrastructure, également dénommé "dépôt en formation géologique profonde".

¹⁹ Le terme allemand a été conservé dans les versions anglaise et française. Il peut être traduit par "Démonstration de la faisabilité du stockage à long terme".

²⁰ La possibilité d'un stockage à l'étranger figure officiellement dans la stratégie suisse de gestion des déchets.

contrôle (pour plus de précisions, se reporter au chapitre 1 du présent rapport). Le contenu des activités à venir et leur calendrier de réalisation seront déterminés à l'issue de l'examen du projet *Entsorgungsnachweis*.

Parmi les objectifs du projet figurent également:

3. La compilation des données nécessaires (i) à la planification générale du stockage des déchets (notamment les estimations des coûts), (ii) à la constitution d'une base scientifique et technique permettant d'évaluer des solutions alternatives pour l'architecture du dépôt et pour un inventaire différent (AC, DHA et plusieurs types de DMAL) et enfin (iii) à la planification des activités futures de recherche et de développement.
4. La mise à disposition de bases scientifiques et techniques sur le stockage des déchets en vue d'un dialogue avec toutes les parties en présence, en particulier avec le public. Un tel dialogue peut contribuer de façon non négligeable à une meilleure compréhension de certains aspects du problème (concepts de stockage, sûreté des dépôts, protection de l'environnement), et mener par conséquent à une discussion plus constructive, puis à une meilleure acceptabilité des programmes de stockage auprès de la population.

L'évaluation de la sûreté (le présent rapport) a les objectifs suivants:

1. Déterminer si, du point de vue de la sûreté à long terme, les Argiles à Opalinus du secteur d'accueil potentiel dans le Weinland zurichois ont les qualités nécessaires pour servir de roche d'accueil.
2. Mettre en lumière les multiples fonctions de sûreté fournies par le système de stockage proposé.
3. Evaluer la "robustesse" du système de stockage au regard des incertitudes qui subsistent, ainsi que l'impact potentiel des phénomènes susceptibles d'affecter les fonctions de sûreté.
4. Fournir une base scientifique pour aborder une série de questions relatives à la conception d'un dépôt. Les résultats de l'évaluation de la sûreté, ainsi que les commentaires des autorités de contrôle, serviront en particulier à la préparation des étapes ultérieures de planification et de développement.

La sûreté de la phase d'exploitation n'est pas traitée dans ce rapport. En revanche, elle est abordée du point de vue qualitatif dans le rapport sur la faisabilité technique.

Ce rapport présente une série d'arguments qui, dans leur ensemble, constituent la *démonstration de la sûreté*, c'est-à-dire la démonstration qu'un dépôt pour AC / DHA / DMAL situé dans les Argiles à Opalinus du Weinland zurichois peut être considéré comme sûr. Cette notion-clé se définit de la façon suivante:

La démonstration de la sûreté

La démonstration de la sûreté est composée d'un ensemble d'arguments et d'analyses qui justifient la conclusion selon laquelle un système de dépôt spécifique peut être considéré comme sûr. Elle contient en particulier la preuve que les critères de sûreté figurant dans le cadre légal peuvent être respectés. Elle comprend également une série de documents qui décrivent l'architecture du système et les fonctions de sûreté, détaillent les performances du système, présentent les données qui étayent les arguments et les analyses, et estiment l'importance relative des éventuelles incertitudes et questions demeurrées sans réponse dans le contexte des décisions à prendre pour la poursuite des travaux.

Les différents chapitres sont brièvement présentés ci-après.

Le chapitre 1 est une introduction visant à **replacer le rapport dans le contexte national**²¹. Les cinq réacteurs actuellement en activité en Suisse (le plus ancien fonctionne depuis 1969), de même que la médecine, l'industrie et la recherche, produisent des déchets radioactifs dont la gestion à long terme doit être assurée. Un concept détaillé de gestion des déchets a par conséquent été élaboré. Grâce au site d'entreposage de Würenlingen, récemment entré en service, on dispose d'une capacité suffisante pour accueillir tous les déchets produits en Suisse, jusqu'à ce que ceux-ci soient transférés dans un dépôt géologique. Pour le stockage géologique, la construction de deux dépôts (l'un pour les déchets de faible et moyenne activité et l'autre pour les AC / DHA / DMAL) a été planifiée en détail.

Selon les dispositions légales en vigueur, (i) les déchets radioactifs produits en Suisse doivent être, en principe, éliminés sur le territoire national (toutefois, la loi définit certaines conditions selon lesquelles, à titre exceptionnel, une licence d'exportation pour le stockage des déchets à l'étranger pourrait être attribuée), et (ii) en Suisse, les producteurs de déchets radioactifs doivent faire en sorte que ceux-ci soient gérés et évacués de manière sûre. Afin de répondre à ces exigences, les compagnies électriques, qui exploitent les centrales nucléaires, et le gouvernement fédéral, responsable de la gestion des déchets provenant de la médecine, de l'industrie et de la recherche, ont créé en 1972 la Société coopérative nationale pour l'entreposage de déchets radioactifs (Nagra). La Nagra est chargée des travaux de recherche et de développement relatifs au stockage final des déchets. D'autres aspects inhérents à la gestion des déchets, tels que le conditionnement, l'entreposage, ainsi que la construction et l'exploitation des infrastructures nécessaires, sont du ressort des producteurs de déchets eux-mêmes ou d'organismes qu'ils auront créés dans cet objectif. L'autorité de contrôle de la Confédération est la Division principale de la sûreté des installations nucléaires (DSN). La Commission fédérale pour la sûreté des installations nucléaires (CSA) est chargée quant à elle d'examiner les projets d'installations nucléaires, y compris ceux qui concernent les dépôts de déchets radioactifs, et de prendre position vis-à-vis du Département fédéral de l'énergie sur les dossiers et les expertises effectuées par la DSN. La directive HSK-R-21, rédigée par la DSN et de la CSA, définit les objectifs de protection pour l'évacuation des déchets radioactifs. En Suisse, toute démonstration de la sûreté, y compris celle qui est présentée ici, se doit de prouver que ces objectifs de protection sont respectés. Le chapitre 1 présente enfin la stratégie élaborée pour la réalisation du dépôt et résume les principales étapes passées et futures.

Le chapitre 2 concerne les **recommandations et les principes qui président au choix du système de stockage et permettent d'évaluer sa sûreté à long terme**. Il présente tout d'abord les recommandations formulées par les organisations internationales et les dispositions du cadre légal et réglementaire suisse, en particulier le nouveau projet de loi sur l'énergie nucléaire (LENu) et la directive suisse HSK-R-21. Selon la LENu, les déchets doivent être mis en dépôt dans une formation géologique appropriée et la fermeture du site doit être précédée d'une phase de surveillance. Ces exigences reposent sur le concept de "stockage géologique durable contrôlé" proposé par le groupe d'experts mandaté par le Conseil fédéral, EKRA²². L'ensemble de ces documents est complété par des principes élaborés par la Nagra au plan interne, sur la base de l'expérience acquise à la fois en Suisse et dans le cadre de ses collaborations avec des organismes étrangers. Ces aspects spécifiques concernent la notion de "robustesse" et la procédure à suivre pour réaliser une analyse de la sûreté, mais aussi le rôle et le traitement de la biosphère, le

²¹ Etat au 31 août 2002. Les conséquences du vote négatif sur la concession pour une galerie de sondage au Wellenberg, site envisagé pour le dépôt destiné aux déchets de faible et moyenne activité, ne sont pas évoquées dans ce rapport.

²² "Expertengruppe Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle" (Groupe d'experts pour les modèles de gestion des déchets radioactifs) nommé par le Conseil fédéral en juin 1999.

traitement des activités humaines futures et les échelles de temps à envisager. Du fait que ces informations émanent de sources diverses et sont par conséquent assez hétérogènes, les principaux résultats ont été groupés et résumés autour des objectifs et principes suivants: (i) les objectifs du stockage géologique, (ii) les objectifs en rapport avec le système (comprenant les *fonctions de sûreté* du système de dépôt, essentielles pour la démonstration de la sûreté), (iii) les objectifs en rapport avec une réalisation par étapes et (iv) les principes d'évaluation. Les fonctions de sûreté jouent un rôle primordial dans la démonstration de la sûreté et sont définies ci-dessous:

Les fonctions de sûreté

Le système de dépôt doit assurer un certain nombre de fonctions relatives à la sécurité et à la sûreté à long terme, que l'on appelle fonctions de sûreté:

- **Isolement des êtres humains et de l'environnement** – La sûreté et la sécurité des déchets, y compris des matières fissiles, sont garanties par leur mise en dépôt dans des formations géologiques profondes, suivie du remblayage, puis du scellement de toutes les voies d'accès, de manière à les isoler des êtres humains et de l'environnement, et à réduire la probabilité d'une intrusion humaine non souhaitée (par exemple un forage) et d'un usage illicite des matériaux. Cette probabilité peut être également limitée si l'on s'assure que, selon l'état des connaissances actuelles, le site ne renferme pas de ressources naturelles économiquement viables et n'est pas susceptible d'être englobé dans un projet de construction futur. Enfin, le processus de sélection doit vérifier l'absence de phénomènes géologiques pouvant remettre en question la stabilité à long terme.
- **Confinement à long terme et décroissance de la radioactivité au sein du système de dépôt** – Une part importante de l'activité présente à l'origine décroît alors que les déchets sont encore confinés dans leur emballage primaire, en particulier dans le cas des assemblages combustibles et des déchets de haute activité pour lesquels les conteneurs en acier ont été conçus pour résister pendant au moins 10 000 ans. Même après la perte d'étanchéité des conteneurs, la stabilité des AC et des DHA dans l'environnement du dépôt, la lenteur des mouvements d'eau, ainsi qu'un ensemble de processus géochimiques provoquant l'immobilisation et le retard du relâchement des radionucléides, font en sorte que la radioactivité demeure pour une large part confinée à l'intérieur du système de barrières ouvragées et de la roche avoisinante et peut, par conséquent, continuer de décroître.
- **Limitation du relâchement dans l'environnement** – Bien qu'il soit impossible d'assurer le confinement total, de tout temps, de l'ensemble des radionucléides, les taux de relâchement restent infimes, notamment pour les AC et les DHA, immobilisés dans des matrices stables. Par ailleurs, plusieurs processus contribuent à ralentir le relâchement des radionucléides au cours de leur migration vers la surface, puis à limiter leur concentration dans l'environnement. Citons à ce propos la décroissance de la radioactivité lors la très lente migration des radionucléides au travers de la roche d'accueil, et l'étalement du relâchement dans le temps et dans l'espace par le biais de processus tels que la diffusion, la dispersion hydrodynamique et la dilution.

Le chapitre 3 définit la **méthodologie utilisée pour élaborer la démonstration de la sûreté**, c'est-à-dire l'approche choisie pour évaluer la sûreté à long terme du dépôt envisagé, sur la base des principes d'évaluation présentés au chapitre 2. Elle comprend (i) l'identification des étapes nécessaires pour réaliser la démonstration de la sûreté et (ii) la définition des arguments qui étayent cette démonstration. Ces deux points sont décrits en détail ci-dessous.

(i) Les étapes de la démonstration de la sûreté comprennent:

- le choix du système de dépôt, par le biais d'une stratégie de développement modulable, basée sur les résultats d'études antérieures, en particulier d'études sur la sûreté à long terme,
- la description du concept de dépôt, élaboré sur la base des connaissances actuelles concernant les événements et processus (Features, Events and Processes ou FEPs) qui caractérisent le système de dépôt et peuvent avoir une influence sur son évolution,
- la définition du concept de sûreté, à partir de "garants de la sûreté"²³ aux mécanismes bien maîtrisés et à l'efficacité reconnue,
- la démonstration de l'impact radiologique du système de dépôt par le biais de la définition et de l'analyse de nombreuses "situations"²⁴, et enfin
- la compilation des arguments et analyses qui constituent la démonstration de la sûreté, suivie de recommandations pour les étapes ultérieures du programme de stockage.

(ii) La démonstration de la sûreté se fonde sur les arguments suivants:

- le bien-fondé du choix du stockage géologique pour la gestion à long terme des déchets radioactifs
- la sûreté et la robustesse du système de stockage choisi,
- la minimisation de la probabilité et des conséquences d'une intrusion humaine dans le dépôt,
- le bien-fondé d'un processus de réalisation par étapes,
- les bonnes connaissances scientifiques disponibles relatives au système de dépôt choisi et à son évolution,
- la pertinence de la méthodologie et des modèles, codes et bases de données utilisés pour l'évaluation de l'impact radiologique,
- divers arguments, notamment le respect des critères de sûreté fixés dans le cadre légal, l'utilisation d'indicateurs de sûreté complémentaires, l'existence d'une réserve d'événements et de processus (FEPs) et l'absence de questions non résolues susceptibles d'affecter la sûreté à long terme.

Le chapitre 4 présente l'état des connaissances actuelles concernant **le système de dépôt envisagé dans les Argiles à Opalinus du Weinland zurichois et ses caractéristiques à l'époque de sa fermeture**. Le choix de l'emplacement et la conception du système de dépôt respectent les objectifs et les principes énoncés au chapitre 2. Les éléments suivants font l'objet d'un développement particulier: (i) les caractéristiques principales du site, (ii) les propriétés principales des Argiles à Opalinus en tant que roche d'accueil, (iii) la disposition générale des ouvrages, (iv) les quantités et caractéristiques respectives des déchets (AC, DHA et DMAL),

²³ En anglais "pillars of safety", littéralement "piliers de la sûreté". Voir définition ci-après, chapitre 6.

²⁴ Le terme de "situation" fait dans ce texte référence à l'anglais "assessment case", littéralement "cas sur lequel porte l'évaluation".

(v) le système de barrières ouvragées et l'architecture du dépôt. Ces éléments sont décrits ci-dessous.

(i) Les caractéristiques principales du site sont les suivantes:

- L'environnement géologique est simple et possède des propriétés structurales, hydrogéologiques et géochimiques prévisibles.
- La région envisagée est stable du point de vue tectonique pour les périodes envisagées et présente un faible taux de soulèvement et d'érosion.
- Selon les connaissances actuelles, les sédiments qui recouvrent le socle rocheux de cette région, de même que le socle cristallin lui-même, ne constituent pas une ressource naturelle de quelque importance.

(ii) Les Argiles à Opalinus ont les propriétés suivantes:

- Leur conductivité hydraulique est extrêmement basse, si bien que les mouvements de solutés au travers de la formation sont plutôt dus à des processus de diffusion que d'advection.
- Du point de vue géochimique, les Argiles à Opalinus constituent un milieu réducteur, légèrement alcalin et modérément salin, favorable à la conservation des barrières ouvragées et à la rétention des radionucléides.
- L'environnement géochimique dans les Argiles à Opalinus et les formations avoisinantes devrait rester stable pendant plusieurs millions d'années²⁵.
- Grâce aux propriétés des Argiles à Opalinus, en particulier leur capacité d'auto-cicatrisation, les fissures naturelles ou causées par le dépôt auront une conductivité hydraulique très basse, ce qui signifie qu'elles n'affecteront que très peu les propriétés hydrauliques du site lui-même.
- Les Argiles à Opalinus sont des argiles indurées (argilites) qui autorisent le creusement d'ouvrages souterrains à plusieurs centaines de mètres de profondeur, notamment l'aménagement de petites galeries sans revêtement et de plus grandes galeries dotées d'un revêtement.

(iii) Le dépôt comprend les éléments suivants:

- une rampe d'accès, des galeries servant à la construction et à l'exploitation du dépôt, une aire centrale pour la réception des colis de déchets et un puits pour la phase de construction et la ventilation,
- une série de galeries de stockage parallèles, pratiquement horizontales, pour les AC et les DHA, d'un diamètre de 2,5 m et espacées entre elles de 40 m,
- trois tunnels de stockage courts et horizontaux pour les DMAL, situés à plusieurs centaines de mètres des galeries réservées aux AC et DHA,
- un dépôt pilote et un dépôt test, selon les spécifications du concept EKRA.

²⁵ Sur cette durée, la seule modification prévisible serait une faible baisse de la salinité.

iv) Du point de vue quantitatif, les déchets se caractérisent de la façon suivante:

- Les estimations reposent sur une durée d'exploitation de 60 ans pour les cinq réacteurs actuellement en activité en Suisse, ce qui correspond à une production totale d'électricité de 192 GWa(e).
- Pour estimer les quantités respectives d'AC et de DHA / DMAL, on pose comme hypothèse que seuls seront retraités les éléments combustibles irradiés pour lesquels il existe actuellement des contrats de retraitement (environ 1195 t_{MLI}).
- On obtient ainsi le chiffre d'environ 3200 t_{MLI} d'assemblages combustibles usés – soient 2065 conteneurs –, 730 conteneurs de déchets de haute activité et environ 7300 m³ de déchets de moyenne activité à vie longue (conditionnés).

(v) Le système de barrières ouvragées comprend les composants suivants:

- Le conteneur pour AC: selon le concept de référence, il s'agit d'une coque en acier permettant d'accueillir soit 4 assemblages combustibles pour REP, soit 9 assemblages combustibles pour REB, avec des parois d'une épaisseur minimale de 15 cm, une longueur d'environ 5 m et un diamètre d'environ 1 m.
- Le conteneur pour DHA: de conception identique à celui qui figure dans le rapport sur le projet *Garantie*, il est composé d'un conteneur en acier renfermant un emballage en acier inoxydable où est placée la matrice de déchets vitrifiés. Les parois du conteneur ont une épaisseur de 25 cm, sa longueur est d'environ 2 m pour un diamètre d'environ 1 m.
- Les conteneurs pour DMAL: les fûts contenant les DMAL sont placés dans des conteneurs de stockage en béton. Un mortier de ciment est utilisé pour combler les espaces entre les fûts.
- Le remblayage des galeries pour AC/DHA: les conteneurs de AC/DHA sont placés sur des blocs de bentonite hautement compactée, parallèlement à l'axe de la galerie et espacés de 3 m entre eux. L'espace restant est comblé à l'aide de bentonite sous forme de granulés.
- Le remblayage des tunnels pour DMAL: les conteneurs de DMAL sont déposés dans les tunnels correspondants et l'espace restant est remblayé à l'aide de mortier de ciment.
- Le remblayage des galeries servant à l'exploitation et à la construction, de l'aire de réception centrale et de la rampe d'accès: il est effectué à l'aide d'un mélange de sable et de bentonite. Pour obturer les galeries, on utilise de la bentonite hautement compactée placée entre des cloisons étanches à plusieurs endroits du dépôt. Le puits est également comblé à l'aide de bentonite compactée.

Le chapitre 5 décrit l'évolution du dépôt dans le temps après sa fermeture, en tenant compte des interactions entre les différents éléments du système. L'évolution probable du site et des barrières ouvragées est évoquée, de même que divers scénarios d'évolution altérée. Sur cette base sont élaborées les "situations" qui seront ensuite analysées en détail du point de vue quantitatif.

Le chapitre 6 analyse l'importance relative des différents éléments et phénomènes et identifie les situations qui vont faire l'objet d'une évaluation. A l'aide d'analyses de sensibilité déterministes, on étudie l'impact possible des scénarios d'évolution altérée, au regard des *fonctions de sûreté* décrites au chapitre 2. Ces études sont complétées par des analyses probabilistes de sûreté et de sensibilité. La prise en compte des aspects qualitatifs et des analyses quantitatives permet d'identifier les principaux éléments et phénomènes qui sont déterminants pour la sûreté et que l'on dénomme *garants de la sûreté*. Du fait du rôle important

qu'ils jouent dans l'élaboration de la démonstration de la sûreté, ces éléments et phénomènes sont définis ci-dessous:

Les garants de la sûreté

Il s'agit des éléments essentiels qui permettent au système de remplir les *fonctions de sûreté*:

- **La localisation du dépôt à une grande profondeur**, sur un site où la probabilité d'une intrusion humaine est faible et où l'on ne prévoit aucun phénomène géologique ou processus susceptible d'affecter la stabilité à long terme;
- **une roche d'accueil** caractérisée par une faible conductivité hydraulique, une texture fine et homogène et une bonne capacité d'auto-cicatrisation, agissant par conséquent comme une barrière efficace face à la migration des radionucléides et constituant un environnement adéquat pour le système de barrières ouvragées;
- **un environnement chimique** qui comprend une série de processus géochimiques d'immobilisation et de retard, favorise la stabilité à long terme des barrières ouvragées et possède lui-même une stabilité suffisante en raison de ses bonnes capacités de tampon chimique;
- **le remplissage et remblayage de bentonite (pour les AC/DHA)**. Interface entre les conteneurs et la roche d'accueil, la bentonite possède des caractéristiques connues et des propriétés similaires à celles de la roche d'accueil, elle assure que l'impact des galeries de stockage et des déchets exothermiques soit aussi faible que possible sur la roche; elle constitue à la fois une barrière efficace à la migration des radionucléides et un environnement adéquat pour les conteneurs et les déchets;
- **des AC et DHA** conditionnés de telle manière qu'ils demeurent stables dans l'environnement du dépôt;
- **des conteneurs pour AC/DHA** solides et résistants à la corrosion dans l'environnement du dépôt, et aptes à confiner efficacement les déchets sur de très longues périodes.

En posant tout d'abord l'hypothèse que les garants de la sûreté fonctionnent de la manière prévue, puis en évoquant les perturbations éventuelles (sur la base des observations faites aux chapitres 4 et 5 et en utilisant les résultats des analyses de sensibilité pour sélectionner les phénomènes pertinents), on peut identifier les situations nécessitant une évaluation quantitative.

Le chapitre 7 présente les résultats de l'analyse des situations identifiées au chapitre précédent. Il débute par une description de la conceptualisation des situations, structurées selon les différentes évolutions possibles du système de dépôt (scénarios) qui déterminent la voie principale de relâchement des radionucléides. Pour chaque scénario, différentes conceptualisations sont prises en compte et pour chaque conceptualisation, on utilise les variations de paramètres pour évaluer les incertitudes. Le point de départ est constitué par le "scénario de référence", qui comprend: un dépôt où les barrières ouvragées fonctionnent comme prévu, une géosphère basée sur la connaissance actuelle de l'environnement géologique et une biosphère dérivée des conditions géomorphologiques, hydrogéologiques et climatiques actuelles, en posant des hypothèses conservatrices pour ce qui concerne les activités humaines et la nourriture. Ensuite, une série de scénarios d'évolution altérée permet d'évaluer les conséquences des incertitudes qui subsistent quant au comportement et à l'évolution du système.

Afin de tester la robustesse du système de dépôt, une catégorie de situations de type "Qu'arriverait-il si..." a été créée pour prendre en compte des phénomènes situés en dehors de la

gamme des possibilités scientifiquement prouvées. Il ne s'agit pas ici d'analyser des situations plausibles, mais plutôt de tester le comportement du système dans des conditions extrêmes. Afin de limiter le nombre de ces scénarios, seuls les phénomènes susceptibles d'affecter les propriétés principales des garants de la sûreté ont été retenus. La liste de ces situations n'a donc pas l'ambition d'être exhaustive.

Les options relatives à l'architecture et au système de dépôt font l'objet d'une évaluation séparée, car elles concernent des conceptualisations où le système est caractérisé plutôt par la flexibilité que par l'incertitude.

La sensibilité de la migration des radionucléides dans la biosphère est illustrée par plusieurs situations relatives à des conditions géomorphologiques et climatiques différentes. Dans le cadre de ces situations, on a cherché à montrer l'impact des incertitudes relatives à la biosphère en utilisant différentes possibilités (stylisées) pour les caractéristiques et l'évolution de l'environnement.

Le chapitre 8 constitue une synthèse des principaux arguments et résultats. Il représente l'étape finale pour la compilation de la démonstration de la sûreté. En reprenant chacun des arguments généraux énoncés au chapitre 3, il fournit un résumé des résultats pour chacun d'entre eux, notamment:

- Le bien-fondé du stockage géologique pour la gestion des déchets radioactifs est confirmé par (i) le fait qu'il est reconnu au niveau international qu'un système de stockage correctement conçu, implanté sur un site bien choisi, garantit la sûreté et la protection des êtres humains et de l'environnement ainsi que la sécurité face à des interventions non souhaitées, aujourd'hui et à l'avenir, (ii) l'existence, en Suisse et dans le monde, de formations géologiques d'accueil appropriées, (iii) les évaluations de la sûreté effectuées dans d'autres pays, (iv) l'observation de systèmes naturels (les "analogues naturels"), et (v) les avantages présentés par le stockage géologique par rapport aux autres options.
- La sûreté et la robustesse du système de stockage sont assurées (i) par un système de barrières passives où un ensemble de phénomènes garantissent les fonctions de sûreté, (ii) en évitant, par le choix d'un site et d'une architecture de stockage appropriés, les incertitudes et les phénomènes affectant la sûreté et (iii) par la stabilité à long terme du dépôt et des Argiles à Opalinus en tant que roche d'accueil.
- La probabilité et les conséquences d'une intrusion humaine peuvent être limitées (i) en faisant en sorte que l'information nécessaire concernant le dépôt soit correctement archivée et transmise aux générations futures, (ii) en vérifiant l'absence de ressources naturelles exploitables dans la région envisagée pour l'implantation du site, (iii) en plaçant les conteneurs d'AC et de DHA dans des compartiments séparés les uns des autres, et enfin en ne stockant que des déchets solidifiés.
- La réalisation du dépôt s'effectue par étapes, c'est-à-dire (i) que dans la phase actuelle, le système n'a pas besoin d'être défini dans les moindres détails, (ii) que l'on ne met en œuvre que des composants parfaitement maîtrisés et caractérisés (site, barrières ouvragées), (iii) que l'on peut engager le dialogue avec les parties concernées, ce qui permet d'obtenir des commentaires et des suggestions d'améliorations, (iv) que le projet est facilement adaptable et peut incorporer au fur et à mesure les résultats de nouvelles études (concernant par exemple la répartition des galeries et tunnels de stockage, le choix de l'architecture de dépôt, l'implantation des installations de surface et même le choix du site, c'est-à-dire qu'il existe d'autres sites possibles, ou d'autres formations rocheuses appropriées) et (v) qu'il est possible d'exercer une surveillance à long terme sur le dépôt et de réviser, si nécessaire, certaines décisions (cette possibilité allant par exemple jusqu'à la récupération des déchets).

- Les connaissances scientifiques disponibles, relatives au système de dépôt choisi et à son évolution sont basées sur (i) les résultats des programmes de recherches sur le terrain au niveau local et régional, comprenant une vaste campagne d'études sismiques en trois dimensions et un forage profond dans le secteur d'accueil potentiel, ainsi que des études complémentaires réalisées dans des laboratoires souterrains, notamment au Mont Terri, et des observations effectuées sur les Argiles à Opalinus dans plusieurs tunnels routiers et ferroviaires, (ii) les résultats de plus de 20 ans d'expérience dans l'élaboration et l'étude d'éléments du système de barrières ouvragées au sein du programme suisse, couplés à l'ensemble des données disponibles au niveau international et (iii) l'existence d'un modèle d'inventaire détaillé des déchets (AC, DHA et DMAL).
- La pertinence de la méthodologie et des modèles, codes et bases de données disponibles pour évaluer les conséquences radiologiques pour un large éventail de situations est confirmée par le fait qu'ils respectent les principes d'évaluation énumérés au chapitre 2.
- Les dispositions légales et réglementaires sont respectées: (i) dans toutes les situations envisagées, les doses maximales sont inférieures (souvent de plusieurs ordres de grandeur) au seuil fixé par la directive de l'autorité suisse de sûreté nucléaire, (ii) conformément à cette même directive, le dépôt proposé peut, à n'importe quel moment d'une éventuelle phase de surveillance prolongée, être fermé en quelques années, et la sûreté du dépôt ne nécessite pas de mesures supplémentaires après la fermeture et (iii) l'architecture de dépôt retenue répond aux exigences du concept de stockage géologique durable contrôlé.
- Les indicateurs de sûreté complémentaires, utilisés conjointement aux indicateurs «classiques» (dose efficace et risque radiologique), comprennent (i) la radiotoxicité des déchets en fonction du temps, comparée à celle des radionucléides existant naturellement (ii) les flux de radiotoxicité dus au relâchement progressif des radionucléides, comparés aux flux de radiotoxicité naturellement présents dans l'environnement de surface, (iii) les concentrations de radiotoxicité émanant du dépôt à l'interface géosphère-biosphère, comparées aux concentrations de radiotoxicité dans les Argiles à Opalinus et (iv) l'évaluation de la répartition de la radiotoxicité dans les différents éléments du système en fonction du temps.
- Certains événements et processus (FEPs) ayant une influence positive sur la sûreté du dépôt n'ont pas été traités, car il n'existait pas, lors de l'étude, de modèles permettant leur analyse quantitative. Parmi ces "FEPs de réserve", qui constituent des arguments supplémentaires en faveur de la sûreté, figurent (i) la co-précipitation des radionucléides avec des minéraux secondaires issus de la corrosion des assemblages combustibles, du verre et des conteneurs (à l'exception de la co-précipitation du radium, qui a été prise en compte dans toutes les situations), (ii) la sorption des radionucléides sur les produits de corrosion des conteneurs, (iii) les concentrations naturelles d'isotopes en solution dans l'eau interstitielle de la bentonite, susceptibles de réduire encore plus la solubilité effective de certains radionucléides, (iv) la sorption irréversible des radionucléides dans le champ proche ou la géosphère (minéralisation de surface), (v) les processus d'immobilisation à long terme dans la géosphère (précipitation/co-précipitation), (vi) le retard du relâchement des radionucléides dû à la lenteur de la corrosion des matériaux métalliques contenus dans les DMAL (par exemples les gaines et les embouts), ainsi qu'une période de confinement complet des DAML assurée par les fûts en acier et les conteneurs de stockage et (vii) la lenteur de la resaturation du dépôt et de ses environs, qui retarde le début des processus de corrosion et de dissolution.
- Du fait que dans plusieurs des situations envisagées, on a opté pour une représentation simplifiée et conservatrice ou pessimiste du fonctionnement du système, les doses calculées sont plus élevées qu'elles ne le seraient dans une situation réelle. Ceci fournit une marge de sûreté supplémentaire.

- A l'issue de l'analyse détaillée d'une large gamme de situations dérivées de façon précise et méthodique, aucune question susceptible d'affecter la sûreté du dépôt n'est restée sans réponse.

Le chapitre 9 présente les principales conclusions:

1. Le projet *Entsorgungsnachweis* répond à une demande émanant du Conseil fédéral qui souhaitait, à l'issue de l'examen du projet *Garantie*, obtenir une démonstration convaincante de la faisabilité du stockage géologique. Les travaux présentés dans ce rapport montrent que la sûreté peut être garantie pour le système choisi, dans les Argiles à Opalinus et le secteur d'accueil potentiel du Weinland zurichois. Les données et analyses démontrent notamment que:
 - le site de référence possède des propriétés suffisantes pour assurer la sûreté du dépôt. La démonstration de la sûreté fournit des arguments à l'appui de cette affirmation: la sûreté est suffisante pour une large palette de situations et la gamme des situations analysées est suffisamment étendue pour couvrir toutes les éventualités;
 - le système est robuste, c'est-à-dire que les incertitudes qui subsistent ne remettent pas la sûreté en question;
 - les informations disponibles pour les déchets et le système de barrières ouvragées sont suffisantes pour une prise de décision. Elles reposent sur plus de 20 ans de recherches en Suisse, ainsi que sur l'expérience acquise par d'autres pays.

De plus, comme le montre en détail le rapport de la même série traitant de la construction du dépôt, les caractéristiques du site et l'architecture envisagée permettent la construction, l'exploitation et la fermeture du dépôt conformément aux spécifications, et par conséquent aux contraintes de sûreté.

Les informations sur le site sont suffisantes et le site est suffisamment bien compris pour étayer les affirmations concernant la sûreté et la faisabilité technique. Le troisième rapport de la série concerne les aspects plus spécifiquement géologiques et démontre que:

- les méthodes de recherche les plus récentes (sismique 3 D) ont permis de bien caractériser la géométrie et la structure de la roche d'accueil et des roches avoisinantes (dite "encaissantes"), si bien que l'on a pu identifier un espace non perturbé suffisamment étendu pour l'implantation d'un dépôt;
 - la roche d'accueil et les roches avoisinantes, caractérisées à l'aide du forage de Benken, ont les propriétés nécessaires pour assurer la sûreté à long terme;
 - les processus susceptibles d'affecter la sûreté ont fait l'objet de recherches détaillées au laboratoire souterrain du Mont Terri, ainsi qu'en laboratoire, et les résultats confirment et complètent les résultats obtenus par le forage de Benken. Les propriétés du site et de la roche d'accueil sont bien connues. Leur évolution peut donc être prédite de manière fiable, sur la base d'études géologiques couvrant une région étendue, et grâce à une situation générale relativement simple.
2. Le projet *Entsorgungsnachweis* fournit une base de discussion et de décision pour la poursuite des travaux dans le cadre du programme suisse de gestion des déchets de haute activité et pour l'évaluation du rôle des Argiles à Opalinus du Weinland zurichois au sein de ce programme. Les excellents résultats obtenus lors des recherches géologiques sur le terrain et par l'évaluation de la sûreté pour le projet *Entsorgungsnachweis* ont conduit la

Nagra à proposer au Conseil fédéral de concentrer ses travaux sur les Argiles à Opalinus du Weinland zurichois pour l'option de gestion des déchets intitulée "Stockage des AC / DHA / DMAL en Suisse"²⁶. Ceci est justifié par²⁷:

- une étude systématique des formations sédimentaires susceptibles de servir de roche d'accueil a montré que les Argiles à Opalinus possédaient un ensemble de caractéristiques particulièrement favorables, telles qu'une structure compacte, de bonnes capacités de retardation, des propriétés d'auto-cicatrisation, et une bonne aptitude à la construction et à l'exploration souterraines;
- une étude systématique des régions d'accueil potentielles a montré que le secteur envisagé du Weinland zurichois possédait une série de qualités favorables, telles qu'une faible activité tectonique, la présence d'une formation non perturbée d'Argiles à Opalinus à une profondeur et sur une étendue suffisantes, et l'existence de roches avoisinantes possédant des qualités similaires à celles de la roche d'accueil;
- les résultats du projet *Entsorgungsnachweis* montrent clairement que, pour un système de référence dans les Argiles à Opalinus du Weinland zurichois,
 - un niveau de sûreté élevé est garanti,
 - la construction, l'exploitation et la fermeture d'un site sont réalisables,
 - le site est doté de bonnes caractéristiques et offre une étendue suffisante.

Les résultats positifs obtenus pour cette roche d'accueil et ce secteur ne signifient pas qu'un système tout aussi sûr ne pourrait pas être implanté dans d'autres régions où les Argiles à Opalinus sont également présentes, ou même dans d'autres formations rocheuses. Cependant, les arguments techniques (basés sur la sûreté, la simplicité de la géologie et le caractère prévisible de l'évolution) qui ont présidé au choix de cette région sont plausibles et reposent sur des bases solides.

3. Un grand nombre d'étapes sont encore nécessaires avant qu'un dépôt ne soit réalisé en Suisse: campagne d'exploration du sous-sol, choix de l'architecture définitive du site et octroi des autorisations nécessaires. Une décision officielle concernant la sélection du site – un jalon décisif au sein du processus d'autorisation – ne sera pas rendue avant au moins 2020. Cela signifie qu'il reste suffisamment de temps pour continuer les recherches et perfectionner le concept de stockage. De ce fait, le degré de précision atteint par les rapports du projet *Entsorgungsnachweis* est adapté à la phase actuelle du programme et il est suffisant pour étayer les conclusions selon lesquelles (i) le stockage géologique des AC / DHA / DMAL en Suisse est réalisable (affirmation n° 1 ci-dessus) et (ii) le choix du Weinland zurichois en tant que secteur d'étude, et celui des Argiles à Opalinus en tant que roche d'accueil, est justifié (affirmation n° 2 ci-dessus).

²⁶ Le stockage à l'extérieur des frontières nationales est une possibilité qui figure officiellement dans la stratégie suisse de gestion des déchets.

²⁷ Pour les deux premiers points, cette approche systématique s'est déroulée par étapes sur plusieurs années, en étroite collaboration et avec l'aval des autorités de contrôle et de leurs experts. Elle a fait l'objet de plusieurs rapports (voir chapitre 1).

Table of Contents

Summary	I
Zusammenfassung.....	XIII
Exposé de synthèse	XXV
Table of Contents	XXXVII
List of Tables.....	XLVII
List of Figures	LI
1 Introduction	1
1.1 Background and scope of this report	1
1.2 Swiss radioactive waste management planning.....	2
1.2.1 Overview	2
1.2.2 Legal framework.....	3
1.2.3 Types of repositories	4
1.2.4 The programme for the management of spent fuel, high-level waste and long-lived intermediate-level waste in Switzerland.....	5
1.2.5 Important elements in the step-wise repository implementation process foreseen in Switzerland	8
1.3 Aims of Project Entsorgungsnachweis and of the safety assessment.....	11
1.4 Hierarchy of Project Entsorgungsnachweis reports and target audiences	12
1.5 Organisation of this report.....	14
2 Guidance and Principles for Choosing the Disposal System and Evaluating Safety	17
2.1 Aims and structure of this chapter	17
2.2 Sources of guidance and principles	18
2.2.1 International guidance	18
2.2.2 The Swiss HSK-R-21 regulatory guideline	18
2.2.3 HSK's assessment concept for the siting feasibility project	19
2.2.4 The revised Swiss Nuclear Energy Law	19
2.3 Discussion of general objectives and principles of geological disposal	19
2.3.1 The choice of geological disposal as a waste management option.....	19
2.3.2 Regulatory principles and protection objectives in Switzerland.....	20
2.4 Discussion of guidance and principles for siting, design and staging	21
2.4.1 International guidance	21
2.4.2 Designing the system for robustness	22
2.4.3 Swiss regulatory guidance on siting and design in HSK-R-21	23

2.4.4	The EKRA concept of monitored long-term geological disposal.....	24
2.4.5	Swiss guidance on a stepwise approach to repository implementation	26
2.5	Discussion of guidance and principles for safety assessment.....	27
2.5.1	International guidance on safety assessment	27
2.5.2	The need to produce a robust safety case	27
2.5.3	Swiss regulatory guidance on safety assessment in HSK-R-21	27
2.5.3.1	Predictive modelling and predictions into the distant future	27
2.5.3.2	Excluded processes and events	28
2.5.3.3	Treatment of uncertainty.....	28
2.5.3.4	Verification of codes and validation of models	28
2.5.3.5	Treatment of the biosphere	28
2.5.4	Specific issues in safety assessment	29
2.5.4.1	Timescales of concern	29
2.5.4.2	The role and treatment of the biosphere	30
2.5.4.3	Treatment of future human behaviour	32
2.5.4.4	Treatment of future human actions.....	32
2.6	Summary and conclusions: Objectives and principles	33
2.6.1	Principal objectives of deep geological disposal: Security and long-term safety.....	33
2.6.2	Objectives related to the system	34
2.6.2.1	Functional objectives: The safety functions of the disposal system	34
2.6.2.2	Principles related to the overall system	35
2.6.2.3	Principles related to repository siting	36
2.6.2.4	Principles related to repository design and implementation	37
2.6.3	Objectives related to stepwise implementation	38
2.6.4	Assessment principles.....	39
2.6.4.1	The focus of the safety case.....	40
2.6.4.2	Scientific understanding	40
2.6.4.3	Systematic and defined method for conducting the analyses	41
2.6.4.4	Multiple arguments for safety.....	42
2.6.4.5	Principles relevant to the documentation of the safety case	42
2.6.5	Summary tables	43
3	Methodology for Developing the Safety Case.....	45
3.1	Aims and structure of this chapter	45
3.2	Background to the methodology.....	45

3.3	Aims of the methodology	46
3.4	Uncertainties to be addressed in developing the safety case	47
3.5	Broad tasks to develop the safety case	48
3.6	Foundations of the safety case	48
3.6.1	The disposal system	48
3.6.2	The system concept	48
3.6.3	The safety concept	49
3.6.4	Identification of assessment cases	49
3.6.5	Arguments and analyses	49
3.7	Constructing the safety case	52
3.7.1	Overview	52
3.7.2	Carrying out the broad tasks to develop the safety case	52
3.7.3	Evaluation and treatment of uncertainties	55
3.7.4	Exploring system behaviour and consequence analysis	56
3.7.5	Assurance of completeness and FEP management	59
3.8	Key messages from this chapter	61
4	Description of the Disposal System for SF / HLW / ILW in Opalinus Clay....	63
4.1	Aims of the chapter	63
4.2	The geological environment of the repository	63
4.2.1	Regional geological setting	65
4.2.2	Nagra studies in the Zürcher Weinland and Opalinus Clay	67
4.2.3	The geological isolation concept of the Opalinus Clay environment	68
4.2.4	Regional and local groundwater flow in the sediment sequence	69
4.2.5	Water and solute movement in the host formation	77
4.2.6	Geochemistry and mineralogy of the Opalinus Clay	85
4.3	The surface environment	87
4.3.1	Regional description	87
4.3.2	Climate	88
4.3.3	Soils and the natural environment	88
4.3.4	Human habitation and economy	89
4.3.5	Land use and agriculture	89
4.3.6	Water resources and usage	89
4.4	Overview of the repository layout and the multi-barrier system	89
4.5	Detailed description of the disposal system at the time of end of waste emplacement	94

4.5.1	Repository layout.....	94
4.5.2	Waste quantities and characteristics	95
4.5.2.1	Spent UO ₂ and MOX fuel.....	97
4.5.2.2	Vitrified HLW	97
4.5.2.3	ILW.....	99
4.5.2.4	Waste acceptance criteria	101
4.5.3	Engineered barrier system and repository design.....	102
4.5.3.1	SF canisters.....	102
4.5.3.2	HLW canister.....	104
4.5.3.3	ILW containers	104
4.5.3.4	Emplacement of wastes, backfilling, monitoring and repository sealing	104
4.5.3.5	Thermal constraints on repository design.....	108
4.5.3.6	Summary of design variants and associated uncertainties.....	110
5	System Evolution	111
5.1	Objectives and scope of this chapter	111
5.2	Climatic, surface environmental and geological setting.....	112
5.2.1	Evolution of climate, surface environment and assumptions about future human behaviour	112
5.2.1.1	Introduction	112
5.2.1.2	Evolution of climate	112
5.2.1.3	Evolution of the surface environment.....	114
5.2.1.4	Assumptions about future human behaviour	119
5.2.2	Evolution of geological setting.....	120
5.2.2.1	Introduction	120
5.2.2.2	Compaction of Opalinus Clay and evolution of hydraulic overpressures	120
5.2.2.3	The effect of uplift and erosion on the properties of the host rock and on the hydrogeological situation	121
5.2.2.4	Potential effects of infrequent geological events.....	122
5.3	Evolution of the SF / HLW near field	123
5.3.1	Radiation-related processes	123
5.3.1.1	Spent fuel.....	123
5.3.1.2	HLW	125
5.3.1.3	Possible deviations from expected radiation-related behaviour	126
5.3.2	Temperature evolution in the SF / HLW near field.....	126
5.3.2.1	Expected evolution	126

5.3.2.2	Possible deviations from expected thermal behaviour	128
5.3.3	Hydromechanical evolution of SF / HLW near field.....	128
5.3.3.1	Evolution of the near field rock and bentonite backfill system	128
5.3.3.2	Hydromechanical evolution of the SF and HLW canisters	132
5.3.4	Chemical evolution of the SF / HLW near field.....	133
5.3.4.1	Evolution of the porewater chemistry of the SF / HLW near field.....	133
5.3.4.2	Porewater composition in the bentonite	135
5.3.4.3	Mineralogical changes in bentonite	137
5.3.4.4	Corrosion of SF and HLW canisters.....	139
5.3.4.5	Chemical processes within a SF canister after breaching.....	140
5.3.4.6	Dissolution of HLW	143
5.3.5	Chemical processes and radionuclide migration in the SF / HLW near field.....	144
5.4	Evolution of the ILW near field.....	148
5.4.1	Radiation-related processes	148
5.4.2	Temperature evolution of the ILW near field.....	148
5.4.3	Hydromechanical evolution of the ILW near field.....	149
5.4.4	Chemical evolution of the ILW near field.....	151
5.4.5	Radionuclide transport processes in the ILW near field.....	154
5.5	Evolution of the far field.....	155
5.5.1	Evolution of shaft and tunnel seals.....	155
5.5.2	Gas migration in the Opalinus Clay.....	155
5.5.2.1	Gas transport mechanisms in Opalinus Clay	155
5.5.2.2	Gas buildup in and migration from ILW emplacement tunnels	157
5.5.2.3	Gas buildup in and gas migration from SF / HLW emplacement tunnels.....	158
5.5.2.4	Possible deviations from expected evolution.....	159
5.5.3	Evolution of radionuclide transport conditions in the far field.....	160
5.5.3.1	Hydrogeological situation after resaturation of repository	160
5.5.3.2	Radionuclide transport in the Opalinus Clay	163
5.5.3.3	Possible deviations from expected transport conditions in the far field	164
5.6	Effects of inadvertent human impacts on repository evolution	165
5.7	Summary of the evolution of the repository system.....	166
5.7.1	Summary of independent evidence for the long-term performance of natural and engineered barriers – natural analogue and field studies	166
5.7.2	Summary of expected disposal system evolution and possible deviations.....	169
5.8	How the selected disposal system meets the objectives of providing security and long-term safety	170

5.8.1	Overall disposal principles	170
5.8.2	Principles related to both site and design.....	178
5.8.3	Principles relevant to repository siting	179
5.8.4	Principles relevant to repository design and implementation.....	179
6	The Safety Concept and the Identification of Assessment Cases	181
6.1	Aims and structure of this chapter	181
6.2	How the system provides safety: The Safety Concept	182
6.3	Modelling the barrier system	184
6.3.1	The need for modelling.....	184
6.3.2	The broad evolution of the barrier system in the Reference Case: The Reference Scenario	185
6.3.3	Conceptualisation of key phenomena in the Reference Case: The Reference Conceptualisation	187
6.3.4	Mathematical models, computer codes and the timescales over which they are applied	191
6.4	The fate of radionuclides within the barrier system in the Reference Case.....	191
6.4.1	The decrease in radiotoxicity with time.....	191
6.4.2	The distribution of radiotoxicity as a function of time	194
6.4.3	Extent of decay within the system components.....	197
6.5	Radionuclide release rates in the Reference Case	199
6.5.1	Release rates from the different waste forms.....	199
6.5.2	Overall comments on radionuclide release rates	202
6.6	Detailed examination of the attenuation of releases during transport through the buffer and host rock	203
6.6.1	Use of insight models and the reference model chain	203
6.6.2	Decay during transport through the buffer and Opalinus Clay.....	204
6.6.3	The spreading in time of the instant release fraction	209
6.6.4	Summary of the performance of the barrier system in the Reference Case.....	210
6.7	Sensitivity analyses.....	210
6.7.1	Approach to sensitivity analysis	210
6.7.2	Sensitivity to alternative assumptions regarding the broad evolution of the barrier system and the conceptualisation of key phenomena.....	211
6.7.2.1	The presence of discontinuities in the Opalinus Clay.....	211
6.7.2.2	The effects of gas on the transport of radionuclides that may be present as volatile species.....	213
6.7.3	Sensitivity to parameter variations around the Reference Case.....	216
6.7.3.1	SF / HLW canister breaching time	216

6.7.3.2	Groundwater flow through the Opalinus Clay.....	218
6.7.3.3	Sorption during transport through the Opalinus Clay.....	222
6.7.3.4	Sensitivity to assumptions regarding the surface environment.....	224
6.7.4	Probabilistic safety and sensitivity analysis	226
6.8	Treatment of uncertainty and the identification of assessment cases	234
6.8.1	Use of expert judgement in the identification of cases	234
6.8.2	Relevance and treatment of specific uncertainties.....	234
6.8.3	Grouping of assessment cases	235
6.8.4	Conservative omissions and reserve FEPs	252
6.9	Key messages from this chapter	253
7	Evaluation of the Performance of the Disposal System.....	257
7.1	Aims and structure of this chapter	257
7.2	Conventions for the presentation of results	258
7.3	Mathematical models and computer codes.....	258
7.4	The Reference Scenario.....	259
7.4.1	Description of the scenario	259
7.4.2	The Reference Conceptualisation	260
7.4.2.1	The Reference Case	260
7.4.2.2	Deterministic parameter variations to the Reference Case	262
7.4.2.3	Probabilistic parameter variations to the Reference Case	265
7.4.3	Solubility-limited dissolution of spent fuel	266
7.4.4	Bentonite thermal alteration	269
7.4.5	Glacially-induced flow in the Opalinus Clay	269
7.4.6	Additional barrier provided by confining units	270
7.4.7	Radionuclide release affected by ramp / shaft.....	272
7.4.8	Convergence-induced release affected by ramp / shaft	275
7.4.9	Gas-induced release of dissolved radionuclides affected by ramp / shaft	278
7.4.10	Summary of results of Reference Scenario.....	281
7.5	Release of radionuclides as volatile species along gas pathways	282
7.5.1	Description of the scenario	282
7.5.2	Release of ^{14}C as volatile species in the gas phase not affected by ramp / shaft ("tight seals")	282
7.5.3	Release of ^{14}C as volatile species in the gas phase affected by ramp / shaft ("leaky seals").....	284
7.5.4	Summary of results of the Scenario "Release of radionuclides as volatile species along gas pathways".....	284

7.6	Release of radionuclides affected by human actions	285
7.6.1	Description of the scenario	285
7.6.2	Borehole penetration into the repository	287
7.6.3	Deep groundwater extraction from Malm aquifer	289
7.6.4	Abandoned repository.....	290
7.6.5	Summary of results of the Scenario "Release of radionuclides affected by human actions"	292
7.7	"What if?" cases.....	292
7.7.1	Introduction	292
7.7.2	High water flow rate in the geosphere.....	293
7.7.2.1	Deterministic analysis.....	293
7.7.2.2	Probabilistic analysis	293
7.7.3	Transport along transmissive discontinuities.....	296
7.7.3.1	Deterministic analysis.....	296
7.7.3.2	Probabilistic analysis	297
7.7.4	Increased fuel matrix dissolution in spent fuel	297
7.7.5	Redox front penetration in the near field.....	300
7.7.5.1	Deterministic analysis.....	300
7.7.5.2	Probabilistic analysis	300
7.7.6	Gas-induced release of dissolved radionuclides from ILW through the ramp only	301
7.7.7	Unretarded transport of ¹⁴ C as volatile species through the host rock.....	302
7.7.8	Poor near field performance, pessimistic near field and geosphere geochemical datasets combined with increased water flow in the host rock.....	303
7.7.9	No advection in the geosphere (diffusive transport only).....	304
7.7.10	Increased cladding corrosion rate in spent fuel	304
7.7.11	Zero sorption for iodine in near field and geosphere.....	304
7.7.12	Decreased transport distance in Opalinus Clay	305
7.7.13	Summary of results of the "What if?" cases	305
7.8	Design and system options	305
7.8.1	Introduction	305
7.8.2	Increased waste arisings	305
7.8.3	ILW high force compacted waste option.....	307
7.8.4	Spent fuel canister with a copper shell	307
7.8.5	Summary of results for the design and system options	308
7.9	Illustration of effects of biosphere uncertainty on calculated dose.....	308

7.9.1	Introduction	308
7.9.2	Alternative geomorphology	310
7.9.3	Alternative climates	311
7.9.4	Summary of results of the illustration of the effects of biosphere uncertainty	312
7.10	Summary and evaluation of results.....	313
8	The Safety Case: Main Arguments and Results	319
8.1	Aims and structure of the chapter	319
8.2	The lines of argument	319
8.2.1	Overview	319
8.2.2	The strength of geological disposal as a waste management option	320
8.2.3	The safety and robustness of the chosen disposal system.....	321
8.2.4	The reduced likelihood and consequences of inadvertent human intrusion	322
8.2.5	The strength of the stepwise repository implementation process	323
8.2.6	The understanding of the system and its evolution.....	324
8.2.7	The safety assessment methodology and the models, codes and databases that are available to assess radiological consequences	324
8.2.8	Multiple arguments for safety.....	329
8.2.8.1	Compliance with regulatory protection objectives	329
8.2.8.2	Complementary safety indicators	335
8.2.8.3	Identification of reserve FEPs	338
8.2.8.4	Absence of outstanding issues with the potential to compromise safety.....	338
8.2.8.5	Summary: Adequate consideration of safety-relevant phenomena	339
8.3	Additional evidence for the effectiveness of deep geological disposal in Opalinus Clay	339
8.4	Guidance for future stages of planning and development	340
9	Conclusions.....	341
9.1	Aims and structure of the chapter	341
9.2	Evaluation of the Opalinus Clay of the Zürcher Weinland as a host rock for the repository from the point of view of long-term safety.....	341
9.3	Understanding of the multiple safety functions that the proposed disposal system provides	342
9.4	Robustness of the disposal system.....	343
9.5	The present safety assessment: A platform for discussion and guidance for future stages of repository planning and development	344
9.6	Overall conclusions	344
10	References.....	347

Appendix 1	Parameter Values, Probability Density Functions and their Application in Deterministic and Probabilistic Assessment Calculations	A-1
A1.1	Values supported by observations and experiments	A-1
A1.2	"What if?" values	A-2
Appendix 2	Key Data for Evaluating Assessment Cases	B-1
A2.1	Radionuclide inventories in reference canisters of SF and HLW and in emplacement tunnels ILW-1 and ILW-2	B-3
A2.2	Other reference data for assessment calculations for SF, HLW and ILW	B-10
Appendix 3	Background to the Alternative Safety and Performance Indicators	C-1
A3.1	Definition of radiotoxicity	C-1
A3.2	Calculation of the radiotoxicity of natural materials.....	C-2
A3.2.1	Natural uranium	C-2
A3.2.2	Uranium ores of various grades	C-3
A3.2.3	Opalinus Clay.....	C-4
A3.2.4	Radiotoxicity of granite and syenite	C-4
A3.2.5	Radiotoxicity of average soil	C-5
A3.3	Radiotoxicity of the wastes	C-5
A3.4	Definition of radiotoxicity flux	C-5
A3.5	Calculation of natural radiotoxicity fluxes.....	C-6
A3.5.1	Rivers Rhine and Thur	C-6
A3.5.2	Biosphere aquifer	C-8
A3.5.3	Annual consumption of mineral water	C-9
A3.5.4	Erosion of the biosphere model area.....	C-10
A3.6	Calculation of the radiotoxicity flux into the biosphere aquifer originating from the repository.....	C-10
Appendix 4	Role and Interaction of Different Groups in Developing the Safety Case ..	D-1
A4.1	Groups of personnel contributing to the safety case	D-1
A4.2	Contributions of the different groups to the safety case.....	D-1
A4.2.1	Overview	D-1
A4.2.2	The management group.....	D-3
A4.2.3	The science and technology group.....	D-3
A4.2.4	The safety assessment group.....	D-4
A4.2.5	The bias audit group.....	D-4
A4.3	The use of expert judgement in decision-making	D-5
A4.3.1	Decisions involving the application of expert judgement	D-5
A4.3.2	Ensuring proper application of expert judgement.....	D-5
Appendix 5	Definitions	E-1

List of Tables

Tab. 1.2-1:	The nuclear power plants currently operating in Switzerland.....	3
Tab. 2.6-1:	Objectives and principles related to system and staging.....	43
Tab. 2.6-2:	Objectives and principles related to safety assessment.....	44
Tab. 4.2-1:	Definition of principal stratigraphic components overlying and underlying the Opalinus Clay host rock.....	64
Tab. 4.2-2:	Properties of regional aquifers and water-conducting formations (minor aquifers) above and below the host rock formation in the area of interest.	77
Tab. 4.2-3:	Hydraulic gradients between different formations in the Zürcher Weinland sedimentary rock sequence.....	79
Tab. 4.2-4:	Key results from the hydrodynamic model for the different cases analysed.....	80
Tab. 4.2-5:	Average mineralogy of the Opalinus Clay.....	85
Tab. 4.2-6:	Reference water chemistry of the Opalinus Clay at the Benken site.....	86
Tab. 4.5-1:	Model inventories of SF and HLW requiring disposal.....	96
Tab. 4.5-2:	Rounded number of disposal canisters of SF and HLW.....	96
Tab. 4.5-3:	The total inventories of materials in the ILW, excluding emplacement containers (cemented waste option).....	100
Tab. 4.5-4:	The rounded number of the various waste drums for disposal of ILW.....	100
Tab. 4.5-5:	Summary of design variants associated with wastes, engineered barrier system and repository design and their implications for safety assessment.....	110
Tab. 5.2-1:	Expected climatic evolution in northern Switzerland for the next one million years.....	113
Tab. 5.2-2:	Local geomorphological units representing possible discharge areas of deep groundwater in northern Switzerland.....	116
Tab. 5.2-3:	Relationship between climate and local geomorphological/hydrological conditions in the surface environment.....	117
Tab. 5.3-1:	Calculated redox potentials within bentonite under the assumption of magnetite/ Fe(II) equilibrium for Fe (II) concentrations equal to those estimated for Opalinus Clay.....	135
Tab. 5.3-2:	Compositions of Opalinus Clay reference water (Pearson 2002) and bentonite porewater.....	136
Tab. 5.3-3:	Comparison of K_d values of various elements derived from diffusion experiments with Kunigel V1 bentonite at a dry density of 1800 kg m^{-3} with those predicted from batch sorption data.....	147
Tab. 5.5-1:	Summary of results of modelling cases examining the transient and steady-state hydraulic flow impacts of a repository in Opalinus Clay.....	162
Tab. 5.7-1:	Key safety-relevant features and phenomena associated with disposal system evolution.....	172

Tab. 6.4-1:	The proportions of the RTI due to key radionuclides that decay within different parts of the barrier system for SF, HLW and ILW	198
Tab. 6.7-1:	Possibilities for analysing and presenting results of PSA calculations	227
Tab. 6.8-1:	The significance and treatment in assessment cases of uncertainties and design / system options associated with specific Super-FEPs	237
Tab. 6.8-2:	List of scenarios, "what if?" cases, design and system options and illustration of effects of biosphere uncertainty with associated conceptualisations and parameter variations that define the different assessment cases, structured according to the categories of uncertainty that they address	250
Tab. 6.8-3:	FEPs that are conservatively omitted in defining the assessment cases, including reserve FEPs	252
Tab. 7.4-1:	Key parameters of the Reference Conceptualisation that are subject to uncertainties/variability and treatment of key parameters within the Reference Case and within parameter variations	263
Tab. 7.4-2:	Summed dose maxima for a single canister, containing various reference and alternative (hypothetical) canister loadings for SF and HLW	264
Fig. 7.4-7:	Scheme with the conceptual model for gas-induced release of dissolved radionuclides through the Opalinus Clay and through the access tunnel system: a) SF, b) ILW	279
Tab. 7.9-1:	Climate-related parameters used in the modelling of the biosphere (parameter values for Reference Case biosphere area)	311
Tab. 7.10-1:	Summary of summed dose maxima for the various scenarios, "what if?" cases, design and system options and illustration of biosphere uncertainty with associated conceptualisations and parameter variations that define the different assessment cases	316
Tab. 8.2-1:	Understanding of the disposal system and its evolution: evidence and arguments for safety-relevant characteristics and the selection of parameter values that provide the foundation for the safety case	325
Tab. 8.2-2:	Summary of maximum annual doses, summed over all radionuclides and the three waste types SF, HLW and ILW, for the various scenarios, "what if?" cases, design and system options and illustration of biosphere uncertainty with associated conceptualisations and parameter variations that define the different assessment cases	332
Tab. A2.1.1:	Inventories of safety-relevant radionuclides in a reference canister containing 9 BWR UO ₂ fuel assemblies with a burnup of 48 GWd/t _{IHM} , after 40 years decay	B-3
Tab. A2.1.2:	Inventories of safety-relevant radionuclides in a canister containing 3 PWR UO ₂ and 1 MOX fuel assemblies with a burnup of 48 GWd/t _{IHM} , after 40 years decay	B-4
Tab. A2.1.3:	Inventories of safety-relevant radionuclides in a canister containing 4 PWR UO ₂ fuel assemblies with a burnup of 48 GWd/t _{IHM} , after 40 years decay	B-5

Tab. A2.1.4:	Average safety-relevant radionuclide content of a single BNFL HLW glass flask, after 40 years decay.....	B-6
Tab. A2.1.5:	Average safety-relevant radionuclide content of a single COGEMA HLW glass flask, after 40 years decay.....	B-7
Tab. A2.1.6:	Total safety-relevant radionuclide inventory of the ILW-1 disposal tunnels, after 40 years decay.....	B-8
Tab. A2.1.7:	Total safety-relevant radionuclide inventory of the ILW-2 disposal tunnel, after 40 years decay.....	B-9
Tab. A2.2.1:	IRF values of key radionuclides for BWR and PWR UO ₂ fuel and PWR MOX fuel.....	B-10
Tab. A2.2.2:	Fractional dissolution rates of spent UO ₂ and MOX fuel.....	B-11
Tab. A2.2.3:	Radionuclide release parameters for fuel assembly structural materials.....	B-11
Tab. A2.2.4:	Other SF near field parameter values.....	B-12
Tab. A2.3:	Reference HLW near field parameter values.....	B-13
Tab. A2.4:	Solubility limits and associated uncertainties for the SF / HLW near field, for Reference Case (pH = 7.25, Eh = -194 mV) and for oxidising conditions ("what if?" case).....	B-14
Tab. A2.5:	Solubility limits and associated uncertainties for the cementitious near field of the waste groups ILW-1 and ILW-2.....	B-15
Tab. A2.6:	Sorption values (K _d), effective diffusion coefficients (D _e) and accessible porosities (ε) in compacted bentonite: Reference Case (pH = 7.25, Eh = -194 mV) incl. lower (pessimistic) and upper (optimistic) limits, and "what if?" case for oxidising conditions.....	B-16
Tab. A2.7:	Sorption values (K _d) in cement for the waste groups ILW-1 and ILW-2: Reference Cases and corresponding lower (pessimistic) and upper (optimistic) limits.....	B-17
Tab. A2.8:	Sorption values (K _d), effective diffusion coefficients (D _{e⊥}) and accessible porosities (ε) in Opalinus Clay.....	B-18
Tab. A2.9:	Transport parameters in Opalinus Clay – Extract of geodataset used in the modelling of geosphere performance.....	B-19
Tab. A2.10:	Dose coefficients for inhalation and ingestion.....	B-20
Tab. A2.11:	Biosphere dose conversion factors (BDCFs).....	B-22
Tab. A2.12:	Biosphere parameters.....	B-23
Tab. A2.13:	Probability distribution functions (PDFs) for probabilistic calculations.....	B-24
Tab. A3.1:	Possible comparisons of radioactive waste, or radionuclides released from the waste, with natural materials.....	C-1
Tab. A3.2:	Dose coefficients (DCs) for ingestion for adult members of the public.....	C-2
Tab. A3.3:	Activity and toxicity concentrations of natural uranium.....	C-2
Tab. A3.4:	Activity and toxicity concentrations of natural radionuclides in various uranium ores.....	C-3

Tab. A3.5:	Volumes assumed to calculate the RTI of waste emplacement tunnels hypothetically filled with natural uranium ores	C-3
Tab. A3.6:	Activity and toxicity concentrations of natural radionuclides in Opalinus Clay	C-4
Tab. A3.7:	Activity and toxicity concentrations of natural radionuclides in granite and syenite	C-4
Tab. A3.8:	Activity and toxicity concentrations of natural radionuclides in average soil ...	C-5
Tab. A3.9:	RTI of spent fuel, vitrified HLW and ILW at selected times.....	C-5
Tab. A3.10:	Possible comparisons of radionuclide fluxes originating from the repository with natural radionuclide fluxes.....	C-6
Tab. A3.11:	Dose coefficients (DCs) for ingestion of radionuclides dissolved in river or aquifer water for adult members of the public	C-6
Tab. A3.12:	Concentrations of natural radionuclides and radiotoxicity in the river Rhine and corresponding radiotoxicity flux	C-7
Tab. A3.13:	Concentrations of natural radionuclides and radiotoxicity in the river Thur and corresponding radiotoxicity flux	C-8
Tab. A3.14:	Concentrations of natural radionuclides and radiotoxicity of water in surface aquifers in northern Switzerland and corresponding radiotoxicity flux	C-8
Tab. A3.15:	Concentrations of natural radionuclides and radiotoxicity of average Swiss mineral water and the radiotoxicity flux corresponding to an annual production of $7.7 \times 10^5 \text{ m}^3$	C-9
Tab. A3.16:	Concentrations of natural radionuclides and radiotoxicity in soil and radiotoxicity flux due to erosion of soil	C-10
Tab. A4.1:	Roles and interaction of different groups.....	E-2

List of Figures

Fig. 1.2-1: Overview of the sources of radioactive waste in Switzerland and the waste-management strategy considered.....	3
Fig. 1.2-2: History and future of the Swiss programme for spent fuel, vitrified HLW and long-lived ILW	5
Fig. 1.2-3: Important elements of decision-making for the step-wise and iterative repository implementation process	10
Fig. 1.4-1: Reporting structure for the safety assessment of Project <i>Entsorgungsnachweis</i>	13
Fig. 1.5-1: Flowchart for the development of the safety case and guide through the safety assessment report, with the chapters in which each topic is discussed indicated	14
Fig. 2.1-1: The role of the present chapter in the sequence of tasks involved in developing the safety case	17
Fig. 2.4-2: Overview of the key components of the concept of monitored long-term geological disposal	25
Fig. 2.5-1: Radiotoxicity index (RTI) of spent fuel (SF), vitrified high-level waste (HLW) and long-lived intermediate-level waste (ILW) as a function of time	30
Fig. 2.5-2: Radiotoxicity index of 1 tonne of representative Swiss spent fuel (BWR) with a burnup of 48 GWd/t and of 8 tonnes of natural uranium.....	31
Fig. 2.5-3: Schematic illustration of the limits of predictability of the different elements of a geological disposal system	32
Fig. 3.7-1: The lines of argument contributing to the safety case and their relationship to the broad tasks for developing the safety case.....	53
Fig. 3.7-2: The procedure for constructing the safety case	54
Fig. 3.7-3: The hierarchy of scenarios, conceptualisations and parameter sets.....	58
Fig. 3.7-4: Strategy for assurance of phenomenological completeness and appropriate treatment by FEP management.....	60
Fig. 4.1-1: The role of the present chapter in the sequence of tasks involved in developing the safety case	63
Fig. 4.2-1: Principal tectonic units of northern Switzerland and adjacent areas	65
Fig. 4.2-2: Schematic geological profiles from SW to NE (top) and NW to SE (bottom) through the sedimentary rocks in the Zürcher Weinland.....	66
Fig. 4.2-3: Burial history of the sedimentary formations in the Zürcher Weinland	67
Fig. 4.2-4: Geological structure of the sedimentary sequences in the vicinity of the Benken borehole, based on 3 D seismic data.....	70
Fig. 4.2-5: Potential area for a repository in Opalinus Clay in the Zürcher Weinland.....	71
Fig. 4.2-6: Lithological sequence based on information from the Benken borehole	72

Fig. 4.2-7: The geological sequence in the Benken borehole (left) and the simplified features illustrating the isolation concept (right)	73
Fig. 4.2-8: Lithological sequence in the Benken borehole and the measured hydraulic heads and hydraulic conductivities	74
Fig. 4.2-9a: Infiltration areas, discharge areas and hydraulic heads in the Muschelkalk aquifer in the region surrounding the Zürcher Weinland	75
Fig. 4.2-9b: Infiltration areas, discharge areas and hydraulic heads in the Malm aquifer in the region surrounding the Zürcher Weinland	76
Fig. 4.2-10: Potential groundwater transport paths based on siting information and hydrodynamic modelling	78
Fig. 4.2-11: Compilation of porosity and permeability data from argillaceous rocks of different maturity after Neuzil (1994) and comparison with results from the Benken borehole and the Mont Terri investigation tunnel	81
Fig. 4.2-12: Diffusion coefficient and porosity for tritium (perpendicular to bedding) in different argillaceous rocks	81
Fig. 4.2-13: Texture and structure of the Opalinus Clay, illustrating characteristics on various scales that give rise to anisotropy in transport properties	82
Fig. 4.2-14: Isotope concentration profiles in porewater across the Opalinus Clay and adjacent rock strata due to diffusion that occurred for 0.25, 0.5 and 1 Ma.	84
Fig. 4.3-1: Schematic illustration of the surface environment in the Rhine valley, indicating the main topographic and near-surface geological features.....	88
Fig. 4.4-1: Possible layout for a deep geological repository for SF / HLW / ILW in Opalinus Clay	90
Fig. 4.4-2: The system of safety barriers in the case of SF	91
Fig. 4.4-3: The system of safety barriers in the case of HLW	92
Fig. 4.4-4: The system of safety barriers in the case of ILW	93
Fig. 4.5-1: Plan view of the repository for SF / HLW / ILW in the Opalinus Clay	95
Fig. 4.5-2: Schematic illustration of the distribution of radionuclides within a fuel rod	98
Fig. 4.5-3: The various waste drums containing ILW	99
Fig. 4.5-4: Canister for the disposal of spent BWR fuel	103
Fig. 4.5-5: Steel canister for the disposal of vitrified HLW	104
Fig. 4.5-6: Emplacement containers for ILW	105
Fig. 4.5-7: Longitudinal section through disposal tunnels for canisters of HLW (top) and SF (bottom) at completion of canister and backfill emplacement	106
Fig. 4.5-8: Cross-sections of ILW emplacement tunnels at the end of waste emplacement, with different types of waste emplacement containers.....	107
Fig. 4.5-9: Status of the repository during the monitoring phase, when waste emplacement is complete, but before final sealing and closure of the facility	108
Fig. 4.5-10: Status of the repository after final sealing and closure of the facility	109

Fig. 5.1-1:	The role of the present chapter in the sequence of tasks involved in developing the safety case	111
Fig. 5.2-1:	Schematic cross-sections (rotated 90°) through the valley bottoms along a typical river valley in northern Switzerland that correspond to local geomorphological units	115
Fig. 5.3-1:	Calculated time-dependent heat production of disposal canisters as a function of time from reactor discharge for: a SF canister with 3 UO ₂ assemblies and 1 MOX assembly (1.50 t _{IHM}), a SF canister with 9 BWR UO ₂ assemblies (1.60 t _{IHM}), all with an average burnup of 48 GWd/t _{IHM} and a canister with an average flask of BNFL HLW glass	124
Fig. 5.3-2:	Calculated time-dependent total α and total β/γ activity of i) a SF canister with 3 UO ₂ assemblies and 1 MOX assembly (1.50 t _{IHM}), all with an average burnup of 48 GWd/t _{IHM} , and ii) an average flask of BNFL HLW glass	124
Fig. 5.3-3:	Time-dependent temperature evolution at various positions within the engineered barrier system and surrounding rock for canisters containing 4 PWR SF assemblies (3 UO ₂ plus 1 MOX)	127
Fig. 5.3-4:	Time-dependent temperature evolution at various positions within the engineered barrier system and surrounding rock for canisters of BNFL HLW glass	128
Fig. 5.3-5:	Temperature distribution for a disposal tunnel with canisters containing 4 PWR SF assemblies (3 UO ₂ plus 1 MOX) at 268 years after emplacement, for a bentonite thermal conductivity of 0.4 W m ⁻¹ K ⁻¹	129
Fig. 5.3-6:	Small-scale demonstration of strength reduction of Opalinus Clay due to water weakening of stressed material at an excavation boundary	130
Fig. 5.3-7:	Normalised dissolution rates of ²³⁸ U and ¹³⁷ Cs from spent fuel in 0.01 mol l ⁻¹ NaHCO ₃ solution under oxidising and reducing conditions	142
Fig. 5.4-1:	Time-dependent total α and total β/γ activity and decay heat of the combined ILW (ILW-1 and ILW-2) inventory for the cemented waste option	149
Fig. 5.4-2:	The time-dependent total gas production rate (STP) in the ILW emplacement tunnels, based on metal corrosion rates and organic decomposition rates discussed in the text	150
Fig. 5.5-1:	Gas transport mechanisms in claystone	156
Fig. 5.5-2:	Evolution of gas pressure in the ILW emplacement tunnels assuming an initial saturation of 50 %, taking into account gas diffusion / porewater displacement, but without consideration of two-phase flow / pathway dilation	158
Fig. 5.7-1:	Range of influence of possible deviations from the expected evolution of the disposal system	171
Fig. 6.1-1:	The role of the present chapter in the sequence of tasks involved in developing the safety case	181
Fig. 6.1-2:	The content of the present chapter in the context of developing the safety case	183
Fig. 6.3-1:	The approximate timescales over which various phenomena that contribute positively to the safety functions are expected to operate	186

Fig. 6.4-1:	The contribution of different radionuclides to the waste inventory, expressed as a radiotoxicity index (RTI), and its variation with time for SF (upper figure), HLW (middle figure) and ILW (lower figure)	192
Fig. 6.4-2:	The evolution and distribution of RTI from SF in the different components of the near field, the Opalinus Clay and regions outside the upper and lower boundaries of the Opalinus Clay.....	193
Fig. 6.4-3:	The evolution and distribution of RTI from SF due to ^{129}I (upper figure) and to ^{237}Np (lower figure).....	195
Fig. 6.4-4:	The evolution and distribution of RTI from HLW in the different components of the near field, the Opalinus Clay and regions outside the upper and lower boundaries of the Opalinus Clay.....	196
Fig. 6.4-5:	The evolution and distribution of RTI from ILW in the different components of the near field, the Opalinus Clay and regions outside the upper and lower boundaries of the Opalinus Clay.....	197
Fig. 6.5-1:	The releases of radionuclides from SF	200
Fig. 6.5-2:	The releases of radionuclides from HLW	201
Fig. 6.5-3:	The releases of radionuclides from ILW	203
Fig. 6.6-1:	The ratio of the timescale for diffusive transport across the Opalinus Clay to half life vs. half life for the radionuclides considered in the safety assessment ...	205
Fig. 6.6-2:	Distance into the bentonite buffer and host rock at which, if a steady state is reached, radionuclide transport rates are attenuated by 99 % (broad bars), and 99.99 % (narrow bars), due to decay during transport.....	206
Fig. 6.6-3:	Profiles of the concentration of very long-lived isotopes of U and Th within the host rock, represented as a semi-infinite medium, after one million years.....	207
Fig. 6.6-4:	The efficiency of the clay barriers as a function of radionuclide migration distance	208
Fig. 6.6-5:	The release rate of ^{129}I at different locations within the barrier system, expressed in terms of a hypothetical dose as defined in the main text	209
Fig. 6.7-1:	The efficiency of the Opalinus Clay transport barrier as a function of the transmissivity of discontinuities, T , assuming these to have spacings of either 10 m (upper figure) or 100 m (lower figure) throughout the Opalinus Clay	212
Fig. 6.7-2:	Drinking water dose, evaluated using a simple insight model, as a function of accumulated gas and steel corrosion rate	214
Fig. 6.7-3:	The barrier efficiencies of the shaft EDZ (upper figure) and the bentonite / sand backfilled ramp (lower figure) as a function of water flow rate along these potential radionuclide transport pathways.....	215
Fig. 6.7-4:	Results of dose calculations for SF and HLW for a range of canister breaching times.....	217
Fig. 6.7-5:	The proportion of the SF matrix that is corroded as a function of time for different canister breaching times.....	217
Fig. 6.7-6:	Radionuclide release, for SF, from the bentonite buffer (upper figure) and from the Opalinus Clay (middle figure) due to ^{129}I for different values of specific groundwater flow through the Opalinus Clay	219

Fig. 6.7-7:	Distance into the bentonite buffer and host rock at which, if a steady state is reached, radionuclide transport rates are attenuated by 99 % due to decay, assuming the Reference Case flow rate through the Opalinus Clay (broad bars), as well as 100-fold and 1000-fold increases in specific flow rate	221
Fig. 6.7-8:	The combined efficiency of the bentonite and Opalinus Clay as a function of q , the specific groundwater flow rate through the Opalinus Clay	222
Fig. 6.7-9:	Scatter plots of half life vs. Reference Case K_d , showing regions in which the barrier efficiency of the Opalinus Clay is less than 99 %, between 99 and 99.99 % and greater than 99.99 %.....	223
Fig. 6.7-10:	Biosphere dose conversion factors for various cases related to uncertainty in conditions in the surface environment.....	225
Fig. 6.7-11:	Dose as a function of time, for SF, for a number of different realisations, including those that gave the highest (sample 164) and the lowest (sample 151) dose maximum out of 1000 realisations	229
Fig. 6.7-12:	Dose as a function of time, for HLW, for a number of different realisations, including those that gave the highest (sample 107) and the lowest (sample 813) dose maximum out of 1000 realisations	231
Fig. 6.7-13:	Dose as a function of time, for ILW, for a number of different realisations, including those that gave the highest (sample 512) and the lowest (sample 368) dose maximum out of 1000 realisations	233
Fig. 7.1-1:	The role of the present chapter in the sequence of tasks involved in developing the safety case	257
Fig. 7.4-1:	Doses for the Reference Case as a function of time	261
Fig. 7.4-2:	Summed dose maxima for SF, HLW and ILW for the Reference Case and ranges of summed dose maxima associated with the different parameter variations considered	265
Fig. 7.4-3a:	Probabilistic analysis of the Reference Conceptualisation – CCDFs for key radionuclides and for the sum over all safety-relevant radionuclides.....	267
Fig. 7.4-3b:	Probabilistic analysis of the Reference Conceptualisation – Evolution of the median, the 95 th percentile and the highest / lowest dose maxima of all samples	268
Fig. 7.4-4:	Illustration of the radionuclide transport pathways in the conceptualisation considering the additional barriers provided by the confining units.....	271
Fig. 7.4-5:	a) Resistor network model for hydraulic calculations of water flow through the tunnel system, b) repository domains for modelling radionuclide transport through the host rock and the ramp / shaft	273
Fig. 7.4-6:	Dose as a function of time for the assessment case considering radionuclide release affected by the ramp / shaft (Base Case)	277
Fig. 7.4-8:	Summed dose maxima and ranges for SF, HLW and ILW for the various conceptualisations and parameter variations of the Reference Scenario considering the release of dissolved	281
Fig. 7.5-1:	Dose maxima and ranges for SF and ILW for the various conceptualisations and parameter variations of the scenario considering a release of volatile ¹⁴ C along gas pathways.....	285

Fig. 7.6-1: Scheme of investigated variants of borehole penetration: a) SF / HLW (near hit), b) SF (direct hit), c) ILW-1 (direct hit)	286
Fig. 7.6-2: Summed dose maxima and ranges for SF, HLW and ILW for the various conceptualisations and parameter variations of the scenario considering a release of radionuclides affected by human actions	292
Fig. 7.7-1: Doses as a function of time for the "what if?" case "high water flow rate in the geosphere" ($100 \times$ Reference Case value)	294
Fig. 7.7-2: Probabilistic analysis of the "what if?" case "high water flow rate in the geosphere" ($100 \times$ Reference Case value)	295
Fig. 7.7-3: Doses as a function of time for the "what if?" case "transport along transmissive discontinuities" (one discontinuity with a hydraulic transmissivity of $10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$)	298
Fig. 7.7-4: Probabilistic analysis of the "what if?" case "transport along transmissive discontinuities" (one discontinuity with a hydraulic transmissivity of $10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$)	299
Fig. 7.7-5: Doses as a function of time for the "what if?" case "redox front penetration in the near field" for spent fuel	300
Fig. 7.7-6: Probabilistic analysis of the "what if?" case "redox front penetration in the near field" for spent fuel	301
Fig. 7.7-7: Summed dose maxima and ranges for SF, HLW and ILW for the various conceptualisations and parameter variations considered as "what if?" cases	306
Fig. 7.8-1: Summed dose maxima and ranges for SF, HLW and ILW for the various conceptualisations and parameter variations considered as design and system options	309
Fig. 7.9-1: Summed dose maxima and ranges for SF, HLW and ILW for the various conceptualisations and parameter variations considered as an illustration of the effects of biosphere uncertainty on calculated doses	313
Fig. 7.10-1: Range of summed dose maxima for SF / HLW / ILW, spanned by all cases analysed for a given scenario	314
Fig. 7.10-2: Plot showing the summed dose maximum vs. the time of occurrence of that dose for all cases analysed	315
Fig. 8.1-1: The role of the present chapter in the sequence of tasks involved in developing the safety case	319
Fig. 8.2-1: Total dose for the Reference Case as a function of time (sum of the three waste types SF, HLW and ILW)	330
Fig. 8.2-2: Summary of maximum annual doses, summed over all radionuclides and the three waste types SF, HLW and ILW, for the various categories of assessment cases	331
Fig. 8.2-3: Scatter plot showing the maximal dose and the time of occurrence of that dose for all cases analysed	335

Fig. 8.2-4: Radiotoxicity flux, for the Reference Case, from the repository (summed over all waste types) at the boundary Opalinus Clay - confining units, compared with a range of radiotoxicity fluxes due to naturally occurring radionuclides.....	336
Fig. 8.2-5: Radiotoxicity concentration, for the Reference Case, in a 1 m thick layer at the top of the Opalinus Clay due to the repository (summed over all waste types), compared with that in Opalinus Clay due to naturally occurring radionuclides.....	337
Fig. A1.1: Schematic illustration of PDFs for a parameter p	A-2
Fig. A1.2: The relationship between "what if?" values and the range of values supported by observations and experiments.....	A-3
Fig. A4.1: The procedure for constructing the safety case, with the roles of different groups indicated by colours	D-3

