

# Käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituksen pitkäaikaisturvallisuus

1	Yleistä	3
2	Säteilyturvallisuus	3
2.1	Yleisperiaate	3
2.2	Annosrajoitusten soveltaminen	3
2.3	Aktiivisuuspäästörajoitusten soveltaminen	3
2.4	Epätodennäköisten tapahtumien huomioonotto	4
2.5	Muun elollisen luonnon suojelun huomioonotto	4
3	Loppusijoituksen suunnitteluperiaatteet	4
3.1	Toteutustapa ja ajoitus	4
3.2	Vapautumisesteet	5
3.3	Loppusijoituspaikka ja -tilat	6
4	Turvallisuusvaatimusten täyttymisen osoittaminen	7
4.1	Lähtökohdat	7
4.2	Skenaarioanalyysi	8
4.3	Mallinnus ja lähtötiedot	8
4.4	Täydentävät tarkastelut	8

Tämä ohje on voimassa 1.12.2001 alkaen toistaiseksi.

Helsinki 2001  
Edita Oyj  
ISBN 951-712-448-1  
ISSN 0783-2451

# Valtuutusperusteet

Säteilyturvakeskus antaa ydinenergian käytön turvallisuutta, turva- ja valmiusjärjestelyjä sekä ydinmateriaalien valvontaa koskevat yksityiskohtaiset määräykset seuraavien lakien ja määräysten nojalla:

- ydinenergialain (990/1987) 55 §:n 2 momentin 3 kohta
- ydinvoimalaitosten turvallisuutta koskevan valtioneuvoston päätöksen (395/1991) 29 §
- ydinvoimalaitosten turvajärjestelyjä koskevan valtioneuvoston päätöksen (396/1991) 13 §
- ydinvoimalaitosten valmiusjärjestelyjä koskevan valtioneuvoston päätöksen (397/1991) 11 §
- ydinvoimalaitosten voimalaitosjätteiden loppusijoituksen turvallisuutta koskevan valtioneuvoston päätöksen (398/1991) 8 §
- käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituksen turvallisuutta koskevan valtioneuvoston päätöksen (478/1999) 30 §.

## Soveltamissäännöt

YVL-ohjeen julkaiseminen ei sinänsä muuta Säteilyturvakeskuksen ennen ohjeen julkaisemista tekemiä päätöksiä. Vasta kuultuaan asianosaisia Säteilyturvakeskus antaa erillisen päätöksen siitä, miten uutta tai uusittua YVL-ohjetta sovelletaan käytössä tai rakenteilla oleviin ydinlaitoksiin ja luvanhaltijoiden toimintoihin. Uusiin ydinlaitoksiin ohjeita sovelletaan sellaisenaan.

Kun Säteilyturvakeskus harkitsee YVL-ohjeissa esitettyjen, uusien turvallisuusvaatimusten soveltamista käytössä tai rakenteilla oleviin ydinlaitoksiin, se ottaa huomioon valtioneuvoston päätöksen (395/1991) 27 §:ssä säädetyn periaatteen. Sen mukaan *turvallisuuden edelleen parantamiseksi on toteutettava sellaiset toimenpiteet, joita käyttökokemukset ja turvallisuustutkimukset sekä tieteen ja tekniikan kehitys huomioon ottaen voidaan pitää perusteltuina.*

Jos halutaan poiketa YVL-ohjeessa esitetystä vaatimuksista, on Säteilyturvakeskukselle esitettävä muu hyväksyttävä menettelytapa tai ratkaisu, jolla saavutetaan YVL-ohjeessa esitetty turvallisuustaso.

# 1 Yleistä

Tässä ohjeessa täsmennetään valtioneuvoston päätöksessä käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituksen turvallisuudesta (VNp 478/1999) annettuja määräyksiä. Ohje koskee loppusijoitusta kiteiseen kallioperään usean sadan metrin syvyyteen rakennettuihin loppusijoitustiloihin, ja se käsittelee loppusijoituksen pitkäaikaisturvallisuutta. Loppusijoituslaitoksen käytön turvallisuutta koskevat määräykset esitetään ohjeessa YVL 8.5.

## 2 Säteilyturvallisuus

### 2.1 Yleisperiaate

VNp 478/1999 5 ja 6 §:issä annetaan tavoitteet pitkäaikaiselle säteilyturvallisuudelle loppusijoituslaitoksen suunnittelua ja loppusijoituksen toteutusta varten. Säteilylain 2 §:ään sisältyvän optimointiperiaatteen ja VNp 478/1999 12 §:ään sisältyvän turvallisuuden jatkuvaa parantamista koskevan periaatteen mukaisesti on kuitenkin kaikin käytännöllisin toimenpitein pyrittävä edelleen vähentämään säteilyaltistusta, vaikka tavoitearvot olisi saavutettu.

### 2.2 Annosrajoitusten soveltaminen

VNp 478/1999 5 §:n 3 momentin mukaan *tarkasteluajanjaksolla, jona ihmisille aiheutuva säteilyaltistus voidaan riittävän luotettavasti arvioida, mutta jonka on oltava vähintään usean tuhannen vuoden mittainen, tulee:*

1. *eniten altistuville ihmisille aiheutuvan efektiivisen vuosiannoksen jäädä alle arvon 0,1 mSv; ja*
2. *muille ihmisille aiheutuvien keskimääräisten efektiivisten vuosiannosten jäädä merkittömän pieniksi.*

Näitä annosrajoituksia sovelletaan niihin todennäköisinä pidettävien kehityskulkujen seurauksena ihmisille aiheutuviin säteilyannoksiin, jotka ovat riittävän luotettavasti arvioitavissa, kun otetaan huomioon elinympäristön muutokset. Altistumisen oletetaan tapahtuvan

loppusijoitustiloista vapautuneista, maanpinnan läheisiin pohjavesiin ja edelleen pintavesistöihin kulkeutuneista radioaktiivisista aineista, kun mahdollisina altistumisreitteinä otetaan huomioon ainakin

- kontaminoituneen veden käyttö talousvetenä
- kontaminoituneen veden käyttö kasteluvetenä ja eläinten juomavetenä
- kontaminoituneiden vesistöjen ja vesijätömaiden käyttö.

Annosrajoitusten soveltamisessa on elinympäristön muutoksista otettava huomioon ainakin maan kohoamisesta aiheutuvat muutokset. Ilmastotyyppi, samoin kuin ihmisten elintavat, ravintotarpeet ja aineenvaihduntaominaisuudet voidaan olettaa nykyisenkaltaisiksi.

Eniten altistuvien ihmisten annosrajoitusta, 0,1 mSv vuodessa efektiivisenä annoksena, sovelletaan loppusijoituspaikan lähiympäristössä asuvaan omavaraiseen perhe- tai pienkyläyhteisöön, johon kohdistuu suurin säteilyaltistus edellä mainittujen altistusreittien kautta. Tämän yhteisön elinympäristössä oletetaan olevan pieni järvi ja pinnanläheisiä pohjavesiä hyödynnävä kaivo.

Tämän lisäksi on tarkasteltava niiden laajempien ihmisjoukkojen saamia keskimääräisiä efektiivisiä vuosiannoksia, jotka asuvat alueellisen järven tai merenrannikon ympäristössä ja altistuvat näihin vesistöihin kulkeutuneista radioaktiivisista aineista. Näiden annosten hyväksyttävyyteen vaikuttaa altistuvan ihmisjoukon koko, mutta enimmillään ne voivat olla sadanosa...kymmenesosa edellä annetusta eniten altistuvien ihmisten annosrajoituksesta.

### 2.3 Aktiivisuuspäästörajoitusten soveltaminen

VNp:n 478/1999 5 § 4 momentin mukaan *loppusijoitetuista ydinjätteistä peräisin olevien elinympäristöön vapautuvien radioaktiivisten aineiden määrien pitkän ajan keskiarvojen tulee alittaa enimmäisarvot, jotka Säteilyturvakeskus asettaa kunkin radionuklidin osalta erikseen.*

*Enimmäisarvot tulee asettaa siten, että:*

1. loppusijoituksesta aiheutuvat säteilyvaikutukset voivat olla enimmillään vastaavasuuruksia kuin luonnon radioaktiivisista aineista aiheutuvat; ja
2. laaja-alaiset säteilyvaikutukset jäävät merkityksettömän pieniksi.

Edellä tarkoitettut nuklidikohtaiset enimmäisarvot aktiivisuuspäästöille elinympäristöön ovat seuraavat:

- 0,03 GBq/a pitkäikäisille, alfasäteilyä lähettäville radium-, torium-, protaktinium-, plutonium-, amerikum- ja curiumisotoopeille
- 0,1 GBq/a nuklideille Se-79, I-129 ja Np-237
- 0,3 GBq/a nuklideille C-14, Cl-36 ja Cs-135 sekä pitkäikäisille uraani-isotoopeille
- 1 GBq/a nuklideille Nb-94 ja Sn-126
- 3 GBq/a nuklidille Tc-99
- 10 GBq/a nuklidille Zr-93
- 30 GBq/a nuklidille Ni-59
- 100 GBq/a nuklideille Pd-107 ja Sm-151.

Näitä enimmäisarvoja sovelletaan niille aktiivisuuspäästöille, jotka aiheutuvat todennäköisinä pidettävistä kehityskuluista ja jotka voivat kulkeutua elinympäristöön vasta useiden tuhansien vuosien päästä. Aktiivisuuspäästöt voidaan laskea enintään 1 000 vuoden keskiarvoina. Nuklidikohtaisten aktiivisuuspäästöjen ja niiden edellä annettujen enimmäisarvojen suhdelukujen summan tulee olla pienempi kuin yksi.

## 2.4 Epätodennäköisten tapahtumien huomioonotto

VNp 478/1999 6 §:n mukaan *pitkäaikaisturvallisuutta heikentävien epätodennäköisten tapahtumien merkitys on selvitettävä ja, jos mahdollista, niiden seurausten ja säteilyvaikutusten odotusarvojen hyväksyttävyyttä on arvioitava* [VNp 478/1999] 5 §:ssä tarkoitettuihin efektiivisen vuosiansioksen raja-arvoihin sekä vapautuvien radioaktiivisten aineiden enimmäismääriin verrattuna.

Edellä tarkoitettuina pitkäaikaisturvallisuutta heikentävinä epätodennäköisinä tapahtumina on tarkasteltava ainakin

- syvän porakaivon tekemistä loppusijoituspaikalle

- jätekapseliin osuvaa kallionäytekairausta
- loppusijoitustilan lähiympäristössä tapahtuva huomattavan suurta kallioliikuntaa.

Tällaisten satunnaisten tapahtumien turvallisuusmerkitys on arvioitava ja mahdollisuuksien mukaan on laskettava niistä aiheutuva vuotuinen säteilyannos tai aktiivisuuspäästö, joka kerrotaan sen arvioidulla aiheutumistodennäköisyydellä. Näin saadun odotusarvon tulee olla pienempi kuin kohdassa 2.2 annettu säteilyannosrajoitus tai kohdassa 2.3 annettu aktiivisuuspäästörajoitus. Jos kuitenkin aiheutuvasta yksilöannoksesta voisi seurata suoria haittavaiikutuksia (annos vähintään noin 0,5 Sv), sen aiheutumisen arvioidun vuotuisen todennäköisyyden suuruusluokan tulee olla enintään  $10^{-6}$ .

## 2.5 Muun elollisen luonnon suojelun huomioonotto

Loppusijoituksella ei saa olla haitallisia säteilyvaikutuksia kasvi- tai eläinlajeihin. Tämän osoittamiseksi tulee arvioida tyypillisiä säteilyannoksia loppusijoituspaikan ympäristön maa- ja vesialueiden eliöstöissä, kun oletetaan eliöstön säilyvän nykyisenkaltaisena. Arvioidun säteilyaltistuksen tulee jäädä selvästi pienemmiksi kuin niiden annosten, joista parhaan käytävissä olevan tieteellisen tiedon mukaan voisi aiheutua luonnon monimuotoisuuden vähenemistä tai merkittävää haittaa jollekin eliöpopulaatiolle. Uhanalaisille kasveille ja eläimille ja kotieläimille ei saa aiheutua merkittävää yksilökohtaistakaan säteilyhaittaa.

# 3 Loppusijoituksen suunnitteluperiaatteet

## 3.1 Toteutustapa ja ajoitus

VNp 478/1999 7 §:n mukaan *loppusijoitus kokonaisuutena on suunniteltava turvallisuuden kannalta edullisesti. Suunnittelussa on otettava huomioon käytetyn ydinpolttoaineen aktiivisuuden vähentäminen välivarastoinnilla sekä parhaan tekniikan ja tieteellisen tiedon hyväksikäyttö. Loppusijoitusta ei kuitenkaan saa tarpeettomasti siirtää.*

*Loppusijoitus tulee suunnitella siten, että pitkäaikaisturvallisuuden varmistaminen ei edellytä loppusijoituspaikan valvontaa ja että loppusijoitustila on avattavissa, mikäli kehittyvä tekniikka tekee sen tarkoituksenmukaiseksi.*

Loppusijoituksen toteutuksen eri vaiheita, sijoituspaikan valinnan jälkeen, ovat

- maanalaisen tutkimustilan rakentaminen ja käyttö sekä muu tarvittava tutkimus-, kehitys- ja suunnittelutyö
- loppusijoituslaitoksen rakentaminen
- käytettyjen polttoainenippujen kapselointi ja jätekapselien siirto loppusijoitustiloihin
- loppusijoitustilojen ja muiden maanalaisten tilojen sulkeminen
- mahdolliset loppusijoituslaitoksen käytön jälkeiset valvontatoimet.

Nämä osin mahdollisesti päällekkäisetkin vaiheet on ajoitettava ja toteutettava pitkäaikaisturvallisuuden kannalta edullisesti. Tällöin otetaan huomioon mm. seuraavat seikat:

- jätteen aktiivisuuden ja lämmöntuoton vähentäminen ennen loppusijoitusta
- parhaan käytettävissä olevan tai käyttöön tulossa olevan tekniikan soveltaminen
- riittävän tutkimustiedon saaminen loppusijoituspaikasta ja muista pitkäaikaisturvallisuuteen vaikuttavista seikoista
- mahdolliset turvallisuuden varmistamiseen tai ydinaseiden leviämisen ehkäisemiseen tarkoitetut valvontatoimet
- tarve säilyttää jätekapselien palautettavuus loppusijoitustiloista
- tavoite säilyttää kallioperän luonnolliset olosuhteet ja muutenkin pitkäaikaisturvallisuuden kannalta edulliset olosuhteet loppusijoitustiloissa
- pyrkimys välttää jätteen pitkäaikaisesta välivarastoinnista aiheutuvia turvallisuusriskejä ja muita rasitteita jälkipolville.

Loppusijoitustilojen sulkemisen jälkeen jätekapselien on oltava palautettavissa loppusijoitustiloista sen ajanjakson aikana, jona teknisten vapautumisesteiden edellytetään estävän lähes täysin loppusijoitettujen radioaktiivisten aineiden vapautumista kallioperään. Loppusijoitus

on suunniteltava siten, että jätekapselien palautus on tarvittaessa mahdollista toteuttaa loppusijoituksen toteutusajankohtana käytettävissä olevilla teknisillä menetelmillä ja kohtuullisin voimavaroin. Palautettavuuden mahdollistaminen samoin kuin mahdolliset valvontatoimet loppusijoituslaitoksen käytön jälkeen eivät saa heikentää pitkäaikaisturvallisuutta.

Loppusijoituslaitoksen käytön aikana on alkuperätallenteiden ja varmistusmittausten avulla hankittava riittävät tiedot loppusijoitetuista ydinmateriaaleista ja ydinjätteistä pitkäaikaistallennusta varten. Loppusijoituslaitos on suunniteltava niin, että käytön jälkeen on mahdollista toteuttaa järjestelyt, joilla havaitaan ja estetään loppusijoitustiloihin kohdistuvat, pitkäaikaisturvallisuuden vaarantavat tai ydinmateriaalivalvontaa koskevien sopimusten vastaiset toimet.

Loppusijoituksen toteutuksessa sekä siihen liittyvässä tutkimus- ja kehitystyössä ja turvallisuuden arvioinnissa on sovellettava asianmukaista laatu järjestelmää ja se on ulotettava kaikkiin organisaatioihin, joilla on olennaista vaikutusta loppusijoitushankkeen pitkäaikaisturvallisuuteen.

### 3.2 Vapautumisesteet

VNp 478/1999 8 §:n mukaan *loppusijoituksen pitkäaikaisturvallisuuden tulee perustua toisinaan varmistaviin vapautumisesteisiin siten, että yhden vapautumisesteen toimintakyvyn vajavuus tai ennustettavissa oleva geologinen muutos ei vaaranna pitkäaikaisturvallisuutta. Vapautumisesteiden on tehokkaasti estettävä loppusijoitettujen radioaktiivisten aineiden vapautumista kallioperään vähintään usean tuhannen vuoden ajan.*

Teknisiä vapautumisesteitä voivat olla

- tiivis, syöpymistä ja mekaanista rasitusta kestävä säiliö, johon polttoaineniput suljetaan
- niukkaliukoinen polttoainematriisi, johon suurin osa radioaktiivisia aineita on sitoutunut

- radioaktiivisten aineiden liukenemista ja kulkeutumista rajoittavat kemialliset olosuhteet jätekapselien ympäristössä
- jätekapselit kallioperästä eristävä, vähäisiä kallioliikuntoja myötäävä väliaine
- täyteaineet ja sulkurakenteet, jotka rajoittavat radioaktiivisten aineiden kulkeutumista louhittujen tilojen kautta.

Luonnollisia vapautumisesteitä voivat olla

- loppusijoitettuja jätekapseleita ympäröivä tiivis kallioperä, joka rajoittaa pohjaveden virtaamaa jätekapselien ympäristössä
- loppusijoitustiloja ympäröivä kallioperä, jossa vähäinen pohjaveden virtaus, pelkistävä ja muutoinkin suotuisa pohjavesikemia sekä pohjaveteen liuenneiden aineiden kiinnittyminen kiveen rajoittavat radioaktiivisten aineiden liikkuvuutta
- kallioperän tarjoama suoja luonnonilmiöitä ja ihmisen toimia vastaan.

Kunkin vapautumisesteen pitkäaikaiselle toimintakyvylle on esitettävä tavoitteet, jotka perustuvat parhaaseen käytettävissä olevaan tutkimustietoon ja asiantuntijaharkintaan. Vapautumisesteen toimintakyvylle sallitaan tilastollisesti harvinaiset poikkeamat tavoitearvoista. Nämä poikkeamat voivat aiheutua esim. teknisten vapautumisesteen valmistus- tai asennusvirheistä tai luonnollisten vapautumisesteen ominaisuuksien satunnaisvaihtelusta tai määrittämisvirheistä. Vapautumisesteen toimintakyky kokonaisuudessaan on kuitenkin mitoitettava siten, että turvallisuusvaatimukset täytetään tällaisista poikkeamista huolimatta.

Vapautumisesteen mitoituksessa on myös otettava huomioon, että jonkin ennakoimattoman ilmiön vuoksi yhden vapautumisesteen toimintakyky saattaa olla huomattavasti tavoitearvoja heikompi. Turvallisuusvaatimusten on täytettävä tässäkin tapauksessa.

Vapautumisesteen toimintakykytavoitteita määritettäessä on otettava huomioon eri tarkasteluajanjaksoina mahdollisesti esiintyvät muutokset ja tapahtumat. Useaan tuhanteen vuoteen asti ulottuvana tarkasteluajanjaksona voi-

daan sijoituspaikan kallioperän ominaisuuksien olettaa säilyvän nykyisenkaltaisina, paitsi että ennustettavissa olevista prosesseista, kuten maankohoamisesta sekä sijoitustilojen louhinnasta ja loppusijoitetusta jätteestä aiheutuvat muutokset otetaan huomioon. Teknisten vapautumisesteen toimintakykytavoitteet on asetettava siten, ettei loppusijoitettuja radioaktiivisia aineita vapaudu kallioperään kyseisenä usean tuhannen vuoden ajanjaksona.

### 3.3 Loppusijoituspaikka ja -tilat

VNp 478/1999 9 §:n mukaan *loppusijoituspaikan kallioperän ominaisuuksien on kokonaisuutena oltava suotuisat radioaktiivisten aineiden eristämiseksi elinympäristöstä. Loppusijoituspaikaksi ei tule valita paikkaa, jossa on jotakin pitkäaikaisturvallisuuden kannalta ilmeisen epäedullista.*

VNp 478/1999 10 §:n mukaan *loppusijoitustilojen on oltava niin syvällä, että maanpäällisten tapahtumien, toimintojen ja olosuhdemuutosten vaikutukset pitkäaikaisturvallisuuteen ovat vähäiset ja että ihmisen tunkeutuminen loppusijoitustiloihin on hyvin vaikeata.*

Loppusijoituspaikan kallioperällä tulee olla riittävästi kohdan 3.2 mukaisia luonnollisen vapautumisesteen ominaisuuksia. Lisäksi kallioperän ominaisuuksien on oltava suotuisat teknisten vapautumisesteen pitkäaikaiselle toimintakyvylle. Pitkäaikaisturvallisuudelle merkityksellisten kallioperän olosuhteiden tulee olla vakaat tai ennustettavat vähintään usean tuhannen vuoden päähän. Tämän jälkeen tapahtuvien, mm. suurista ilmastonmuutoksista aiheutuvien geologisten muutosten vaihtelualueen tulee olla arvioitavissa, ja ne on otettava huomioon vapautumisesteen toimintakykytavoitteita asetettaessa.

Loppusijoituspaikaksi soveltumattomuutta osoittavia seikkoja voivat olla

- hyödyntämiskelpoisten luonnonvarojen läheisyys
- epätavallisen suuret kalliojännitykset
- ennustettavissa oleva poikkeuksellisen suuri seisminen tai tektoninen aktiivisuus



- pohjaveden poikkeuksellisen haitalliset ominaisuudet, kuten pelkistyskyvyn puute sekä sellaisten aineiden suuret pitoisuudet, jotka voivat heikentää vapautumisesteiden toimintakykyä.

Loppusijoitustilojen sijainnin on oltava edullinen alueella esiintyviin pohjaveden virtauksiin nähden.

Loppusijoitusvyvyys on valittava pitkäaikaisturvallisuuden kannalta edullisesti ottaen huomioon ainakin

- kallioperän geologiset rakenteet ja kivilajien ominaisuudet
- kalliojännitysten, lämpötilan sekä pohjaveden virtauksen ja ominaisuuksien muutokset syvyyden myötä.

Loppusijoitustilat tulee kuitenkin sijoittaa usean sadan metrin syvyyteen, jotta maanpäällisten luonnonilmiöiden, kuten jäätiköitymisen, ja ihmisen toiminnan vaikutukset vaimenevat riittävästi.

Loppusijoitustiloja ympäröivän kallion rakenteet, joilla voi olla merkitystä pohjaveden virtauksen, kallioliikuntojen tai muiden pitkäaikaisturvallisuuden kannalta tärkeille seikoille, on määritettävä ja luokitettava. Jätekapselien sijoittaminen loppusijoitustiloihin on tehtävä siten, että jätetään riittävä etäisyys sellaisiin kallioperän rakenteisiin, jotka saattaisivat muodostua loppusijoitettujen radioaktiivisten aineiden nopeiksi kulkeutumisteiksi tai muutoin heikentää vapautumisesteiden toimintakykyä.

Loppusijoitustilojen ja muiden maanalaisten tilojen rakentamisessa, käytössä ja sulkemisessa käytettävät menetelmät on valittava siten, että kallioperä parhaalla tavalla säilyttää luonnolliset vapautumisestekominaisuutensa. Pitkäaikaisturvallisuuden kannalta haitallisten aineiden, kuten orgaanisten ja hapettavien aineiden, kulkeutuminen loppusijoitustiloihin on pidettävä mahdollisimman vähäisenä.

## 4 Turvallisuusvaatimusten täyttymisen osoittaminen

### 4.1 Lähtökohdat

VNp 478/1999 28 §:n mukaan *pitkäaikaisturvallisuutta koskevien säteilyturvallisuusvaatimusten täyttyminen sekä loppusijoitusmenetelmän ja loppusijoituspaikan soveltuvuus on perusteltava turvallisuusanalyysillä, jossa tarkastellaan sekä todennäköisinä pidettäviä kehityskulkuja että pitkäaikaisturvallisuutta heikentäviä epätodennäköisiä tapahtumia.*

Turvallisuusanalyysiin tulee sisältyä

- loppusijoitusjärjestelmän (jätekapselien, täyteaineiden ja -rakenteiden, louhittujen tilojen, ympäröivän kallioperän ja pohjaveden sekä loppusijoituspaikan) kuvaus ja vapautumisesteiden määrittely
- loppusijoitusjärjestelmän mahdollista tulevaa käyttäytymistä kuvaavien kehityskulujen määrittely (skenaarioanalyysi)
- vapautumisesteiden toimintakykytavoitteiden määrittely
- loppusijoitusjärjestelmän toiminnan kuvaus konseptuaalisten ja matemaattisten mallien avulla ja niissä tarvittavien lähtötietojen määrittäminen
- loppusijoitettavasta jätteestä vapautumisesteiden läpi elinympäristöön vapautuvien radioaktiivisten aineiden määrien ja niistä aiheutuvien säteilyannosten määrittäminen
- mahdollisuuksien mukaan pitkäaikaisturvallisuutta heikentävistä epätodennäköisistä tapahtumista aiheutuvien aktiivisuuspäästöjen ja säteilyannosten todennäköisyyksien arviointi
- epävarmuus- ja herkkyysanalyysit sekä kvalitatiiviset lisätarkastelut
- analyysien tulosten vertaaminen turvallisuusvaatimukseen
- turvallisuusanalyysin dokumentointi.

Turvallisuusanalyysin eri vaiheet on dokumentoitava huolellisesti. Tavoitteena tulee olla

- havainnollisuus, eli että turvallisuusanalyysin kunkin osan lähtökohdat, menetelmät, tulokset ja kytkentä kokonaisuuteen käyvät helposti selville
- jäljitettävyys, eli että perustelut käytetyille olettamuksille, lähtötiedoille ja malleille on löydettävissä turvallisuusanalyysistä tai sen viiteraporteista.

Turvallisuusanalyysi on esitettävä periaatepää-töshakemuksen, alustavan turvallisuusselosteen, lopullisen turvallisuusselosteen ja lopullisen sulkemissuunnitelman yhteydessä. Turvallisuusanalyysi on lisäksi uudistettava, mikäli on saatu uutta tietoa, joka saattaisi ratkaisevasti muuttaa analyysin tuloksia asetettuihin turvallisuusvaatimuksiin nähden.

## 4.2 Skenaarioanalyysi

Skenaarioanalyysin tulee käsittää sekä todennäköisinä pidettävät kehityskulut että pitkäaikaisturvallisuutta heikentävät epätodennäköiset tapahtumat. Skenaariot on koostettava systemaattisesti niistä ilmiöistä, tapahtumista ja prosesseista, joilla voi olla merkitystä pitkäaikaisturvallisuudelle ja jotka voivat aiheutua

- loppusijoitusjärjestelmän sisäisistä mekaanisista, termisistä, hydrologisista ja kemiallisista vuorovaikutuksista
- ulkoisista seikoista, kuten ilmastonmuutoksesta, geologisista prosesseista tai ihmisen toiminnasta.

Perusskenaariot tulee pohjautua vapautumisestelle määriteltyihin toimintakykytavoitteisiin, kun otetaan huomioon satunnaiset poikkeamat tavoitearvoista. Yhden vapautumisesteen olennaisesti heikentyneen toimintakyvyn vaikutusta tai, mikäli vapautumisesteen välillä on kytkentää, yhtä useamman vapautumisesteen heikentyneiden toimintakykyjen yhteisvaikutusta on analysoitava muunnelmaskaarioiden avulla. Pitkäaikaisturvallisuutta heikentävien epätodennäköisten tapahtumien vaikutusten analysointia varten on muodostettava häiriöskenaarioita.

## 4.3 Mallinnus ja lähtötiedot

VNp:n 478/1999 29 §:n mukaan *käytettäviä laskennallisia menetelmiä valittaessa lähtökohtana on pidettävä, että todellisen säteilyaltistuksen ja vapautuvien radioaktiivisten aineiden todellisten määrien tulee suurella varmuudella olla pienempiä kuin turvallisuusanalyysin antamat tulokset.*

Loppusijoitettujen radioaktiivisten aineiden vapautumisen ja kulkeutumisen laskennallista arviointia varten on ensin muodostettava konseptuaalisia malleja. Niillä kuvataan ne ilmiöt ja fysikaaliset ja kemialliset prosessit, jotka sätelevät kunkin vapautumisesteen toimintaa. Näiden vapautumista ja kulkeutumista varsinaisesti kuvaavien mallien lisäksi tarvitaan vapautumisesteen toimintakykyyn vaikuttavia olosuhteita kuvaavia malleja. Konseptuaalisista malleista johdetaan, yleensä yksinkertaistaen, vastaavat laskennalliset mallit. Malleja yksinkertaistettaessa samoin kuin niiden tarvitsemia lähtötietoja valittaessa tavoitteena tulee olla, että vapautumisesteen toimintakykyä ei yliarvioida, mutta samalla vältetään myös sen liiallista aliarviointia.

Mallinnuksen ja lähtötietojen määrittämisen on perustuttava parhaaseen käytettävissä olevaan tutkimustietoon ja asiantuntijakäsitykseen, jotka on saatu laboratoriotutkimusten, kallioperätutkimusten ja luonnollisten analogioiden tutkimisen kautta. Mallien ja lähtötietojen tulee soveltua kyseessä olevaan skenaarioon, tarkasteluajanjaksoon ja loppusijoitusjärjestelmään. Eri mallien ja lähtötietojen tulee olla keskenään ristiriidattomia, paitsi jos yhteensopimattomuus on näennäistä ja aiheutuu vain tehdyistä yksinkertaistuksista tai vapautumisesteen toimintakyvyn yliarvioimisen välttämiseksi.

## 4.4 Täydentävät tarkastelut

Niiden skenaarioiden, joita ei voida kattavasti ja perustellusti kuvata numeerisella turvallisuusanalyysillä, merkitys on selvitettävä täydentä-



vin tarkasteluun. Ne voivat käsittää esim. yksinkertaistetuilla menetelmin tehtyjä laskelmia, vertailuja luonnollisiin analogioihin tai sijoituspaikan geologista historiaa koskevia havaintoja. Tällaisten tarkastelujen merkitys on sitä suurempi, mitä pitempi tarkasteluajanjakso on kyseessä, ja yli miljoonan vuoden päähän ulottuva

turvallisuuden arviointi voidaan pääasiassa perustaa tällaisiin täydentäviin menetelmiin.

Täydentäviä menetelmiä tulee soveltaa myös varsinaisen turvallisuusanalyysin rinnalla lisäämään luottamusta analyysin tai sen osan tuloksiin.