Inhaltsverzeichnis

	Kurzfassung	III
	Abstract	V
1	Einleitung	1
1.1	Zielsetzung des Vorhabens	1
1.2	Arbeitsprogramm	3
2	Arbeiten und Ergebnisse in den Arbeitspaketen „Projektmanagement und Projektcontrolling (AP 1)“ und „Informationsaustausch und Programmkoordination (AP 2)“	5
2.1	Projektmanagement und Projektcontrolling (AP 1).....	5
2.2	Informationsaustausch und Programmkoordination (AP 2)	8
3	Baulinienspezifische Arbeiten und Baulinienhandbücher (AP 3)	11
3.1	Zielsetzung	11
3.2	Verfolgung und Auswertung von Informationen zu den Reaktorbaulinien WWER-1000, WWER-440 und RBMK.....	11
3.2.1	Verfolgung des Störungsgeschehens in Kernkraftwerken mit russischen Anlagen	12
3.2.2	Arbeitstreffen mit ukrainischen und russischen Experten zur Auswertung der Betriebserfahrungen der Kernkraftwerke	15
3.2.3	Fachdossiers zu aktuellen sicherheitstechnischen Fragestellungen	17
3.2.4	Teilnahme und Auswertung von Konferenzen zur Sicherheit der WWER-Reaktoren	26
3.2.5	Fachgespräch zu den russischen Reaktoren der Baulinie WWER- 1000/W-320 in Bulgarien, Tschechien und in der Ukraine.....	31
3.2.6	Einsatz von softwarebasierter Sicherheitsleittechnik in den WWER- Anlagen	31
3.3	Pflege und Weiterentwicklung der GRS-Baulinien-Handbücher	40

4	Verfolgung und Aufarbeitung von Entwicklungen neuer Reaktorkonzepte (AP 4)	47
4.1	Zielsetzung	47
4.2	Erweiterung und Aktualisierung der Wissensbasis „Nukleare Sicherheit im Ausland“	47
4.3	Erweiterung der Kenntnisse und Vergleich der Sicherheitsansätze in neuen leistungsstarken Reaktoren (sogenannte GEN-3 Konzepte)	53
4.3.1	Ausgewählte länderspezifische Unterschiede der EPR-Versionen.....	54
4.3.2	Sicherheitstechnisches Konzept des Hualong One Reaktors.....	61
4.4	Erweiterung der Kenntnisse und Vergleich der Sicherheitsansätze bei innovativen Reaktoren (GEN-4 Konzepten)	63
4.4.1	Sicherheitsansätze bei natriumgekühlten Schnellen Reaktoren	64
4.4.2	Sicherheitsansätze bei Hochtemperaturreaktoren.....	67
4.4.3	Konzeptbeschreibung HTR Modul / HTR-PM.....	69
4.5	Erweiterung der Kenntnisse und Vergleich der Sicherheitsansätze bei „Small and Modular Reactors“ (SMR Konzepten)	70
4.5.1	Konzeptbeschreibung NuScale.....	71
4.5.2	Kurzkonzeptbeschreibung IMSR.....	76
4.5.3	Kurzkonzeptbeschreibung UK SMR.....	81
4.5.4	Mikroreaktoren.....	83
4.5.5	Cogeneration Anwendungen von SMR	90
4.6	Erweiterung und Dokumentation der Erkenntnisse zu neuen russischen Reaktoren	95
4.6.1	Anlagenbeschreibung AES-2006 mit WWER-1200/W-491	95
4.6.2	Weiterentwicklung der Wissensbasis zu neuen russischen Reaktoren	97
4.7	ENSREG Peer Review Mission zum Stresstest Report der belarussischen Aufsichtsbehörde	101
4.8	Teilnahme und Auswertung von Konferenzen zu neuen Reaktoren	103
5	Modellentwicklung für reaktorphysikalische Analysen (AP 5)	113
5.1	Weiterentwicklung der Simulationsprogramme für schnelle, flüssigmetallgekühlte Kernreaktoren	113
5.1.1	Zielsetzung	113

5.1.2	Beschreibung des Datensatzes für den BN-800 Reaktorkern	115
5.1.3	Entwicklung eines Open-Core Modells des BN-800 Kerns.....	117
5.1.4	Entwicklung des Modells des gesamten Kühlkreislaufs des BN-800 Reaktors	119
5.1.5	Modellierung von Natriumsieden im natriumgekühlten schnellen Reaktor BN-800.....	136
5.1.6	Entwicklung eines Python-Moduls im Kernsimulator KMACS für Wirkungsquerschnittserzeugung.....	139
5.1.7	Berechnung des Brennstoff-Abbrands für den BN600-MOX-Kern.....	140
5.1.8	Implementierung einer natriumspezifischen Druckverlustkorrelation in ATHLET 3.2 über die ATHLET-Python-Schnittstelle	142
5.2	Methodenentwicklung zur Nutzung Künstlicher Neuronaler Netze (KNN) am Beispiel des OECD/NEA-Benchmarks Rostov-2	143
5.2.1	Analyse des vorläufigen Datensatzes aus dem Rostov-2 Benchmark....	143
5.2.2	KNN für die Interpolation von Wirkungsquerschnitten	150
6	Modellentwicklung und Störfallanalysen für russische Reaktorkonzepte (AP 6).....	157
6.1	Zielsetzung	157
6.2	Entwicklung und Test des ATHLET-Anlagendatensatzes für das neue russische Reaktorkonzept AES-2006.....	158
6.2.1	Datenbericht zu einem Reaktor des Typs WWER-1200/W-491	158
6.2.2	Entwicklung des ATHLET-Datensatzes mit Experten von SEC NRS	160
6.2.3	Datensatzbeschreibung	162
6.2.4	Überprüfung des Datensatzes durch einfache Testrechnungen.....	164
6.2.5	Verbesserung des Dampferzeugermodells	168
6.3	Erstellung von Reglermodellen	169
6.3.1	Einleitung.....	169
6.3.2	Vergleich BOP-Routinen und BOP-Plugin	170
6.3.3	Regler auf Basis des Analysesimulators ATHLET-CMS.....	173
6.3.4	Regler nach SEC NRS Datenbericht.....	175

7	Analyse von schweren Störfällen in WWER-1000-Reaktoren (AP 7)	179
7.1	Weiterentwicklung der gekoppelten Analysen mit ATHLET-CD und COCOSYS.....	179
7.1.1	Zielsetzung	179
7.1.2	Durchgeführte Arbeiten und Arbeitsergebnisse.....	180
7.1.3	Zusammenfassung	239
7.2	Untersuchungen zur Außenkühlung des WWER-1000-Druckbehälters mit ATHLET-CD.....	240
7.2.1	Übersicht	240
7.2.2	Durchgeführte Arbeiten.....	240
8	Untersuchungen zu Sicherheitsstrategien bei neuen Reaktorkonzepten (AP 8)	245
8.1	Vertiefte Untersuchung zur Umsetzung des gestaffelten Sicherheitskonzeptes bei neuen Reaktoren	245
8.2	Vertiefte Untersuchung von alternativen Brennstoffkonzepten	251
8.3	Verfolgung des Standes von W&T bei Strategien zu Schmelzerückhaltung und passiven Systemen	254
9	Verfeinerte Untersuchungen zur Grenztragfähigkeit von Containmentstrukturen bei äußeren Einwirkungen infolge Flugzeugabsturz (AP 9)	257
9.1	Einleitung.....	257
9.2	Simulationsmodell eines WWER-1000 Kernkraftwerks (Typ B-466) für den Lastfall Flugzeugabsturz	257
9.3	Untersuchung des Einflusses von Modellparametern	260
9.3.1	Einfluss der Modellierungsfeinheit	260
9.3.2	Einbettung der Bewehrungselemente in die Beton-Volumenelemente... ..	261
9.3.3	Beton-Materialmodell.....	262
9.3.4	Feinheit der Bewehrungsdiskretisierung	266
9.4	Variation der Aufprallgeschwindigkeit	268
9.5	Berücksichtigung von Auf- und Anbauten des Reaktorgebäudes.....	272
9.6	Zusammenfassung und Ausblick	275

10	Erfahrungsaustausch zu aktuellen Fragen der nuklearen Sicherheit	279
10.1	Nukleare Sicherheit und Strahlenschutz beim Umgang mit Kernbrennstoffen und radioaktiven Abfällen sowie bei der Stilllegung von Kernkraftwerken	279
10.1.1	Gemeinsamer Rechenbenchmark mit SEC NRS zum Vergleich der numerischen Verfahren zur Nuklidinventarbestimmung von bestrahltem Kernbrennstoff.....	279
10.1.2	Erfahrungsaustausch zu nuklearer Sicherheit und Strahlenschutz beim Umgang mit Kernbrennstoffen und radioaktiven Abfällen sowie bei der Stilllegung von Kernkraftwerken.....	284
10.2	Erfahrungsaustausch zu Sicherheitsanalysen für das KKW Armenien ...	293
10.3	Weitere fachliche Expertentreffen	297
11	Sicherheitstechnische Untersuchungen für KKW mit RBMK-Reaktoren (AP 11).....	303
11.1	Weiterentwicklung der Modelle für Analysen des Störfalllokalisierungssystems von RBMK-Reaktoren.....	303
11.1.1	Zielsetzung	303
11.1.2	Weiterentwicklung des 3D Modells für das Druckabbausystem mit CoPool.....	304
11.1.3	Unsicherheits- und Sensitivitätsanalyse für ein kleines Leck.....	322
11.2	Modellentwicklung und Analyse des Kernverhaltens bei Störfällen in RBMK-Reaktoren.....	349
11.2.1	Zielsetzung	349
11.2.2	Realistische Berücksichtigung der Xenon Vergiftung	350
11.2.3	Restart Funktion	351
11.2.4	Sonstige Modellentwicklungen.....	351
11.2.5	Fehlerhafte Einspeisung des Notkühlsystems in den Reaktor.....	353
12	Sicherheitstechnische Analysen für gemischte Reaktorkerne sowie zur Rekritikalität bei einem schweren Kernschmelzunfall für WWER-1000-Reaktoren (AP 12)	363
12.1	Einleitung und Zielstellung	363

12.2	Sicherheitstechnische Analysen für gemischte Reaktorkerne von WWER-1000-Reaktoren (AP 12.1)	364
12.2.1	Anforderungen an sicherheitstechnischen Analysen von gemischten Kernbeladungen für WWER-1000 Reaktoren	365
12.2.2	Entwicklung von Modellverbesserungen und Weiterentwicklung der Reaktorphysikalischen Programme	366
12.3	Entwicklung eines Modells zur Berechnung der Rekritikalität nach einem schweren Kernschmelzunfall für WWER-Reaktoren (AP 12.2)....	382
12.3.1	Modellverifizierung mit Hilfe des Monte Carlo Programms SERPENT ...	406
12.4	Internationaler Informationsaustausch über aktuelle Fragen der Sicherheitsbewertung von WWER- und DWR-Anlagen sowie der Validierung und Verifizierung von reaktorphysikalischen Daten und Programmen (AP 12.3).....	407
12.5	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	409
13	Pilotanwendung, Weiterentwicklung und Optimierung von Wissensnetzen und Informationsplattformen (AP 13)	413
13.1	Aufgabenstellung	413
13.2	Konzeptionelle Weiterentwicklung für interne sowie organisationsübergreifende Wissens- und Informationsplattformen	414
13.2.1	Weiterentwicklung der Wissensbasis „Nukleare Sicherheit im Ausland“	414
13.2.2	Weiterentwicklung der Prozesse des Wissensmanagements unter Nutzung des InfoServers	416
13.2.3	Konzeptionelle Überlegungen zur Verbesserung der Suche	420
13.3	Erprobung von geeigneten Pilotanwendungen des NEXTRA/ InfoServers	420
13.3.1	Piloterprobungen zur Weiterentwicklung der Wissensbasis „Nukleare Sicherheit im Ausland“	421
13.3.2	Erprobung geeigneter semantischer Tools zur Weiterentwicklung von Taxonomien.....	424
13.3.3	Erprobung des Einsatzes von Geoinformationssystemen (GIS).....	425
13.3.4	Erprobung sonstiger Tools zur Verbesserung von SharePoint Portalen.	427
13.4	Betrieb und Aktualisierung der implementierten Wissens- und Zusammenarbeitsportale auf dem InfoServer	428

13.4.1	Weiterentwicklung des Portals für Nukleare Sicherheit (PNS).....	429
13.4.2	Weiterentwicklung des GRS Cooperation Portal (GCP).....	431
13.4.3	Weiterentwicklung des RISKAUDIT-Portals (RAP)	434
13.4.4	Weiterentwicklung des EUROSAFE-ETSON-Portals (EEP).....	435
13.5	Betrieb und Weiterentwicklung der Wissensbasis „Nukleare Sicherheit im Ausland“.....	436
13.6	Pflege und Aktualisierung von Dokumentensammlungen	442
13.6.1	Pflege und Weiterentwicklung der DokulNT.....	442
13.6.2	Pflege und Aktualisierung des Projektkontrollsystem IntPro und weiterer Datensammlungen	444
13.7	Anbindung bzw. Überführung weiterer GRS-Datenbestände	445
13.8	Benutzersupport und HelpCenter.....	446
13.9	Verbesserung der Benutzerfreundlichkeit des NEXTRA	447
13.10	Erfahrungsaustausch.....	447
13.11	Externe Unterstützung	448
13.12	Zusammenfassung	448
14	Kooperation mit europäischen Regulatoren und deren TSO (AP 14).....	451
14.1	Zielsetzung	451
14.2	Koordinierung der bilateralen Zusammenarbeit und Informationsaustausch mit Russland	451
14.3	Koordinierung der bilateralen Zusammenarbeit und Informationsaustausch mit der Ukraine.....	456
14.4	Informationsaustausch mit weiteren Regulatoren und deren TSOs.....	458
14.5	Erfahrungsaustausch zum Aufbau eines Wissens- und Kooperationsplattformen von SSTC NRS	459
14.6	Wissensaufbereitung aus multilateralen Projekten (INSC u.a.)	459
14.7	Mitarbeit an Aktivitäten der ETSON Arbeitsgruppe für Wissensmanagement	460
15	Tschernobyl-Aktivitäten (AP 15).....	463
15.1	Einleitung.....	463

15.2	Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse	464
15.2.1	Entwicklungen am Standort	464
15.2.2	New Safe Confinement (NSC)	464
15.2.3	Trockenlager für bestrahlte Brennelemente aus den Blöcken des KKW Tschernobyl ISF-2	470
15.2.4	Trockenlager für bestrahlte Brennelemente aus den Blöcken der KKW Riwne, Südukraine und Chmelnyzkyj	473
15.2.5	Anlagen zur Entsorgung von radioaktiven Abfällen in der Exclusion Zone	474
15.3	Zusammenarbeit mit SSTC NRS zu den brennstoffhaltigen Materialien	476
15.4	Konferenz im November 2018	480
15.5	Brände in der Exclusion Zone von Tschernobyl	482
15.6	Schlussfolgerungen	486
16	Weiterentwicklung von internationalen Netzwerken der nuklearen Sicherheit (AP 16)	489
16.1	Zielsetzung	489
16.2	Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse	489
16.2.1	Entwicklung der deutschen Wissensplattform NNSKP	489
16.2.2	Global Education and Training Resources - GETR	493
16.2.3	Weitere durchgeführte Aktivitäten im Rahmen dieses Arbeitspaketes....	495
16.2.4	IAEO Netzwerk zum Erfahrungsaustausch über den Einfluss von COVID-19 auf den Betrieb kerntechnischer Anlagen	495
17	Internationale Kooperation und Mitarbeit in multilateralen Aktivitäten (AP 17)	499
17.1	Einleitung und Zielsetzung	499
17.2	Jahrestreffen des WWER Regulators Forum	499
17.3	Mitarbeit in der "Working Group on Regulatory Use of PSA (PSAWG)" .	501
17.4	Mitarbeit in der "Reactor Physics Working Group (RPWG)"	503
17.5	Mitarbeit in der "Working Group on Ageing Management (WGPSA)"	505
17.6	Multilaterale Konferenzen	506
17.7	WWER-1000 Benchmark der RPWG	507

17.7.1	Spezifikationen der Gitter- und Kernphysik von WWER-1000-Reaktoren.....	508
17.7.2	Berechnungen auf Gitter-Ebene	509
17.7.3	Zusammenfassung	514
18	Zusammenfassung	515
	Literaturverzeichnis.....	531
	Abbildungsverzeichnis.....	549
	Tabellenverzeichnis.....	563
	Abkürzungen.....	565