

Berichts-Nr. Auftragnehmer: 2023-618350-659.0-1

**Untersuchung zu den technischen
Voraussetzungen eines Einsatzes von
Akkuhybridfahrzeugen im Netz „Bayerwald“
Ergänzungsbericht**

Kurztitel: „Akkuhybridfahrzeuge Bayerwald“

Auftraggeber

Bayerische Eisenbahngesellschaft mbH

Boschetsrieder Straße 69

81379 München

Dresden, 15.12.2023



Firmenanschrift: Kompetenzzentrum Hochleistungsbahnen der TU Dresden
c/o IFB Institut für Bahntechnik GmbH
Wiener Straße 114/116
01219 Dresden

Tel.: +49 351 877 59 52
Fax: +49 351 877 59 90
E-Mail: sk@bahntechnik.de

Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. Arnd Stephan

Bearbeiter: Dipl.-Ing. Eckert Fritz (IFB)
Dipl.-Ing. Nick Jacob (IFB)
B. Eng. Jens Elger (IFB)
Dipl.-Ing. Nyascha Thomas Wittemann (TUD)
M. Sc. Richard Kayser (TUD)

Änderungsverzeichnis

Datum	Bearbeiter	Änderung
24.11.2023	Jacob, IFB Fritz, IFB Wittmann, TUD	Erstellung Ergänzungsbericht
13.12.2023 / 15.12.2023	Jacob, IFB Fritz, IFB Wittmann, TUD	Einarbeitung Anmerkungen BEG/StMB

Inhalt

Abbildungsverzeichnis	6
Tabellenverzeichnis	8
Abkürzungsverzeichnis	9
Anlagenverzeichnis.....	11
1 Aufgabenstellung und Methodik	13
2 Technologiebeschreibung	16
2.1 Dieseltriebwagen (Diesel Multiple Unit – DMU)	16
2.2 Oberleitungs-/Batterie-Hybridtriebwagen (Battery Electric Multiple Unit – BEMU)	16
2.3 Wasserstoff-/ Batterie-Hybridfahrzeuge (Fuel Cell Multiple Unit – FCMU)	16
2.3.1 Charakterisierung der Technologie	16
2.3.2 Fahrzeugbeispiele Wasserstoff-/Batterie-Hybrid	18
2.3.3 Auslegungskriterien für H ₂ -Fahrzeuge	23
3 Infrastruktur für Wasserstoffbereitstellung	27
3.1 Wasserstoffversorgung	27
3.2 Herstellung	27
3.2.1 Prozesse	27
3.2.2 Einbindung erneuerbarer Energien	29
3.3 Bereitstellung	34
3.3.1 Aggregatzustände	34
3.3.2 Verteilungskonzepte bei gleisferner Erzeugung	36
3.4 Systemkonzepte für die Versorgung	37
3.4.1 Standortwahl	37
3.4.2 Systemauswahl	38
4 Betrieblich-technische Randbedingungen	40
4.1 Untersuchungsraum	40
4.2 Fahrzeuge	40
4.3 Betriebliche Netzinfrastruktur	41
5 Betrieblich-technische Machbarkeit.....	42
5.1 Methodik BEMU	42
5.2 Untersuchung des Einflusses der Elektrifizierung Klatovy – Bayerisch Eisenstein	42
5.3 Gesamtübersicht des erforderlichen Infrastrukturbedarfs BEMU bei vollständiger Elektrifizierung des tschechischen Netzanteils	46

5.4	Methodik FCMU	47
5.5	Betriebsnachweis FCMU.....	47
5.5.1	Analyse der Betriebskonzepte	47
5.5.2	Berechnung des spezifischen Wasserstoffbedarfs	50
5.6	Gesamtübersicht des erforderlichen Infrastrukturbedarfs FCMU ..	50
6	Kostenermittlung und -vergleich	55
6.1	Methodik LCC	55
6.2	Fahrzeugbezogene Kosten	55
6.3	Infrastrukturbezogene Kosten	55
6.4	Betriebskostenschätzung	57
6.5	Kostenvergleich DMU vs. BEMU vs. FCMU.....	60
6.5.1	Lebenszykluskostenuntersuchungen im Bayerwaldnetz	60
6.5.2	Betrachtete Fälle	61
6.5.3	Ergebnisse des Wirtschaftlichkeitsvergleichs.....	63
6.5.4	Zusammenfassung/ Übersichten Wirtschaftlichkeitsvergleiche.....	71
7	Zusammenfassung	74

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Antriebsstrang eines Wasserstoff-/Batterie-Hybrid	17
Abbildung 2: Bsp. Alstom iLint.....	19
Abbildung 3: Bsp. Siemens Mireo Plus H.....	20
Abbildung 4: Bsp. Stadler H ₂ -Triebzug für die SBCTASBCTA auf der InnoTrans 2022,	22
Abbildung 5: Darstellung der schwankenden Verfügbarkeit von Solar- (orange) und Windenergie-Onshore (grün) im Verlauf von zweieinhalb Tagen.	30
Abbildung 6: Topologie des „Energiepark Mainz“ – Energieversorgungs- Möglichkeit aus dem öffentlichen Netz ist nicht dargestellt. 32	
Abbildung 7: Power to Gas (P2G/PTG) Anlage des „Energiepark Mainz“ 33	
Abbildung 8: Energetische und stoffliche Topografie des Projekts „Westküste 100“	33
Abbildung 9: Wasserstofftrailer mit integrierter Verdichtung und Dispensern. Quelle: Linde AG, 2016.....	39
Abbildung 10: Übersicht des resultierenden Infrastrukturbedarfs für das Bayerwaldnetz bei Vollelektrifizierung von Klatovy bis Bayerisch Eisenstein.....	46
Abbildung 11: SOC-Verlauf der Dynamikbatterie, kurzer FCMU, Klatovy – Bayerisch Eisenstein.....	49
Abbildung 12: Spezifischer H ₂ -Bedarf kurzer und langer FCMU	50
Abbildung 13: Ansicht Tankstelle der EVB/ Linde in Bremervörde	51
Abbildung 14: Bf Zwiesel mit Markierung einer möglichen Fläche, Google Earth Luftaufnahme.....	52
Abbildung 15: Bf Viechtach mit nahezu keinen möglichen Flächen, Google Earth Luftaufnahme.....	53
Abbildung 16: Bf Plattling mit Markierung möglicher Flächen, Google Earth Luftaufnahme	54
Abbildung 17: Ergebnis Fall 1 neu ohne Restwertbetrachtung (keine Durchbindung nach CZ)	63

Abbildung 18: Ergebnis Fall 1 neu mit Restwertbetrachtung (keine Durchbindung nach CZ)	64
Abbildung 19: Ergebnis Fall 1a neu ohne Restwertbetrachtung (keine Durchbindung nach CZ)	65
Abbildung 20: Ergebnis Fall 2 neu ohne Restwertbetrachtung (Durchbindung nach CZ)	66
Abbildung 21: Ergebnis Fall 2 neu mit Restwertbetrachtung (Durchbindung nach CZ)	67
Abbildung 22: Ergebnis Fall 2a neu ohne Restwertbetrachtung (Durchbindung nach CZ)	67
Abbildung 23: Ergebnis Fall 2 neu ohne Restwertbetrachtung – Preisreduzierung je FCMU (Fahrzeug) um je 1 Mio. EUR... ..	68
Abbildung 24: Ergebnis Fall 3 neu ohne Restwertbetracht. (Durchbind. nach CZ, lange Fzge.).....	69
Abbildung 25: Ergebnis Fall 3 neu mit Restwertbetrachtung (Durchbind. nach CZ, lange Fzge.).....	69
Abbildung 26: Ergebnis Fall 1 neu (ohne Durchbindung nach CZ, kurze Fahrzeuge).....	71
Abbildung 27: Ergebnis Fall 1a neu (ohne Durchbindung nach CZ, kurze Fahrzeuge).....	72
Abbildung 28: Ergebnis Fall 2 neu (mit Durchbindung nach CZ, kurze Fahrzeuge).....	72
Abbildung 29: Ergebnis Fall 2a neu (mit Durchbindung nach CZ, kurze Fahrzeuge).....	73
Abbildung 30: Ergebnis Fall 3 neu (mit Durchbindung nach CZ, lange Fahrzeuge).....	73

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Energiebedarf und SOC-Bilanz der RB 35 bis Bayerisch Eisenstein mit verkürzter OLIA Zwiesel.....	43
Tabelle 2: Energiebedarf und SOC-Bilanz RB 35 bis Klatovy mit reduzierter Oberleitungsinfrastruktur.....	45
Tabelle 3: Vergleich der Sollfahrzeiten und der in OpenTrack (OT) errechneten Fahrzeiten	48
Tabelle 4: Kostensätze BEMU-Infrastrukturmaßnahmen	56
Tabelle 5: Kostensätze FCMU-Infrastrukturmaßnahmen	57
Tabelle 5: Angenommene Rahmenbedingungen der Betriebskosten	58

Abkürzungsverzeichnis

BEKL	Bezdekov u Klatov
BEMU	Battery Electric Multiple Unit/ Oberleitungs-/Batterie-Hybridtriebwagen
DMU	Diesel Multiple Unit/ Dieseltriebwagen
DESE	Desenice
FCMU	Fuel Cell Multiple Unit/ Brennstoffzellen bzw. Wasserstoff-/Batterie-Hybridtriebwagen
HAST	Hamry-Hojsova Straz
HOBR	Hojsova Straz-Brcalnik
HVO	Hydrotreated Vegetable Oil
JAUH	Janovice nad Uhlavou
KLAT	Klatovy
NAUR	Außenried
NBEI	Bayerisch Eisenstein
NBHF	Böhmhof
NBMA	Bodenmais
NBMS	Bettmannsäge
NDG	Deggendorf Hbf
NFU	Frauenau
NGF	Grafling
NGFA	Grafling-Arzting
NGFU	Grafenau
NGPA	Gumpenried-Asbach
NGRS	Großarmschlag
NGZ	Gotteszell
NGZG	Gotteszell DB-Grenze
NKNB	Klingenbrunn
NLG	Langdorf
NLH	Lichtenthal
NLT	Ludwigsthal
NPAD	Patersdorf
NPK	Pankofen
NPL	Plattling
NREG	Regen
NRNU	Rosenau/Grafenau
NRUF	Ruhmannsfelden
NSNI	Schnitzmühle
NSPU	Spiegelau

NTEN	Teisnach
NTRI	Triefenried
NTRS	Teisnach Rohde & Schwarz
NVIC	Viechtach
NYRS	Nyrsko
NZWL	Zwiesel (Bay)
NZWU	Zwieselau
PEUH	Petrovice nad Uhlavou
SPBE	Spicak
ZECE	Zelezna Ruda centrum
ZELH	Zelena Lhota
ZEME	Zelezna Ruda mesto
SOC	State of Charge in % (Ladezustand einer Batterie)
OLIA	Oberleitungsinselfanlage

Anlagenverzeichnis

Anlage 1: SOC-Verlauf der Dynamikbatterie, kurzer FCMU, RB 35 Plattling – Zwiesel	1
Anlage 2: SOC-Verlauf der Dynamikbatterie, kurzer FCMU, RB 35 Zwiesel – Bayerisch Eisenstein	2
Anlage 3: SOC-Verlauf der Dynamikbatterie, kurzer FCMU, RB 35 Bayerisch Eisenstein – Klatovy	3
Anlage 4: SOC-Verlauf der Dynamikbatterie, langer FCMU, RB 35 Plattling – Zwiesel	4
Anlage 5: SOC-Verlauf der Dynamikbatterie, langer FCMU, RB 35 Zwiesel – Bayerisch Eisenstein	5
Anlage 6: SOC-Verlauf der Dynamikbatterie, langer FCMU, RB 35 Bayerisch Eisenstein – Klatovy	6
Anlage 7: SOC-Verlauf der Dynamikbatterie, kurzer FCMU, RB 35 Klatovy – Bayerisch Eisenstein	7
Anlage 8: SOC-Verlauf der Dynamikbatterie, kurzer FCMU, RB 35 Bayerische Eisenstein – Zwiesel	8
Anlage 9: SOC-Verlauf der Dynamikbatterie, kurzer FCMU, RB 35 Zwiesel – Plattling	9
Anlage 10: SOC-Verlauf der Dynamikbatterie, langer FCMU, RB 35 Klatovy – Bayerisch Eisenstein	10
Anlage 11: SOC-Verlauf der Dynamikbatterie, langer FCMU, RB 35 Bayerisch Eisenstein – Zwiesel	11
Anlage 12: SOC-Verlauf der Dynamikbatterie, langer FCMU, RB 35 Zwiesel – Bayerisch Eisenstein	12
Anlage 13: SOC-Verlauf der Dynamikbatterie, kurzer FCMU, RB 36 Grafenau – Zwiesel	13
Anlage 14: SOC-Verlauf der Dynamikbatterie, kurzer FCMU, RB 36 Zwiesel – Grafenau	14
Anlage 15: SOC-Verlauf der Dynamikbatterie, langer FCMU, RB 36 Grafenau – Zwiesel	15
Anlage 16: SOC-Verlauf der Dynamikbatterie, langer FCMU, RB 36 Zwiesel – Grafenau	16

Anlage 17: SOC-Verlauf der Dynamikbatterie, kurzer FCMU, RB 37 Bodenmais – Zwiesel	17
Anlage 18: SOC-Verlauf der Dynamikbatterie, kurzer FCMU, RB 37 Zwiesel – Bodenmais	18
Anlage 19: SOC-Verlauf der Dynamikbatterie, langer FCMU, RB 37 Bodenmais – Zwiesel	19
Anlage 20: SOC-Verlauf der Dynamikbatterie, langer FCMU, RB 37 Zwiesel – Bodenmais	20
Anlage 21: SOC-Verlauf der Dynamikbatterie, kurzer FCMU, RB 38 Viechtach – Gotteszell.....	21
Anlage 22: SOC-Verlauf der Dynamikbatterie, kurzer FCMU, RB 38 Gotteszell – Viechtach.....	22
Anlage 23: SOC-Verlauf der Dynamikbatterie, langer FCMU, RB 38 Viechtach – Gotteszell.....	23
Anlage 24: SOC-Verlauf der Dynamikbatterie, langer FCMU, RB 38 Gotteszell – Viechtach.....	24
Anlage 25: Fahrzeugbezogene Kosten kurze Fahrzeuge	25
Anlage 26: Fahrzeugbezogene Kosten lange Fahrzeuge	26
Anlage 27: RB 35/36/37 Oberleitungsinselanlage Zwiesel (Bettmannsäge – Zwiesel).....	27
Anlage 28: RB 35/36/37 Oberleitungsinselanlage Zwiesel – Bauwerke im Abschnitt Bettmannsäge – Zwiesel	28
Anlage 29: RB 35 Elektrifizierung deutscher Teil Bahnhof Bayerisch Eisenstein.....	29

1 Aufgabenstellung und Methodik

Veranlassung und Zielsetzung

Die Bayerische Eisenbahngesellschaft mbH (BEG) ist eine hundertprozentige Tochtergesellschaft des Freistaats Bayern. Sie plant, finanziert und kontrolliert seit 1996 im Auftrag des Freistaats Bayern den bayerischen Regional- und S-Bahn-Verkehr, so auch die Schienenpersonennahverkehrsleistungen im heutigen „Waldbahnnetz“.

Um den Klimazielen des Freistaats Bayern näherzukommen und gleichzeitig den Dieselbetrieb abzulösen, soll das „Waldbahnnetz“ (RBs 35, 36, 37 und 38) als Los 3 des „Regionalverkehr Ostbayern“-Netzes mit lokal emissionsfreien Fahrzeugen zur Betriebsaufnahme im Dezember 2034 ausgeschrieben werden. Die Neuausschreibung erfolgt gegebenenfalls grenzüberschreitend von Bayerisch Eisenstein nach Klatovy in Tschechien.

Zu den technischen Voraussetzungen eines Einsatzes von Akkuhybridfahrzeugen im Bayerwaldnetz wurden vom Kompetenzzentrum Hochleistungsbahnen bereits in 2021/2022 umfangreiche Untersuchungen durchgeführt, siehe Bericht: *2022-12-19 BEG Bayerwald Bericht_2022-618350-659.0_fin*.

Ziel der Studie im Jahr 2022 war der Nachweis der Machbarkeit eines robusten, pünktlichen und störungsfreien Betriebes mit Oberleitungs-/Batterie-Hybridfahrzeugen. Es wurden die dafür erforderliche Infrastruktur ermittelt, Aussagen über die notwendigen technischen Anpassungen im Bestand getroffen sowie eine Wirtschaftlichkeitsuntersuchung erarbeitet.

Die erarbeitete Studie wurde nun um eine Ergänzungsuntersuchung, mit zwei wesentlichen Untersuchungsaspekten, erweitert:

- Auswirkungen auf Machbarkeit und Kosten des Akku-Betriebes der Relation RB 35 bei einer Elektrifizierung zwischen Klatovy (CZ) und Bayerisch Eisenstein,
- Einsatz von wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen als Alternative zu batterieelektrischen Fahrzeugen.

Die wissenschaftliche Bearbeitung unterteilt sich dementsprechend in zwei Arbeitspakete, welche nachfolgend näher erläutert werden.

Auswirkungen auf den Akku-Betrieb der RB 35 bei Elektrifizierung Klatovy (CZ) – Bayerisch Eisenstein.

In der bereits durchgeführten Untersuchung zum Einsatz von BEMU-Fahrzeugen im Bayerwaldnetz wurden die für einen Betrieb der RB 35 bis Klatovy (CZ) erforderlichen betrieblichen Randbedingungen und notwendigen Infrastrukturmaßnahmen ermittelt. Eine betrieblich-technische Machbarkeit mit dem Ziel eines robusten, pünktlichen und störungsfreien Fahr(gast)betriebs setzt dafür eine Oberleitungsinselanlage auf tschechischem Gebiet voraus.

Für die aktuelle Untersuchung soll nunmehr von einer Komplettelektrifizierung zwischen Klatovy (CZ) und Bayrisch-Eisenstein, inklusive des gesamten Bahnhofs Bayerisch Eisenstein, ausgegangen werden. Hintergrund sind entsprechende Überlegungen hierzu bei den Projektpartnern in Tschechien.

Hierbei wird der Einfluss dieser umfangreichen Elektrifizierung auf tschechischer Seite auf den Betrieb und den erforderlichen Infrastrukturbedarf mit untersucht.

Im Einzelnen werden dafür auf Basis der Voruntersuchung folgende Arbeitsschritte durchgeführt:

- Prüfung der erforderlichen Ladezeiten und Ladestandorte unter Berücksichtigung der in der Voruntersuchung konsolidierten Betriebskonzepte,
- Anpassung der erforderlichen Ladeinfrastruktur unter Berücksichtigung einer Komplettelektrifizierung zwischen Klatovy (CZ) und Bayerisch-Eisenstein inklusive des bayerischen Bahnhofsteils,
- Anpassung der Mengengerüste und Kosten der erforderlichen Ladeinfrastruktur, (die Kostenanteile auf tschechischer Seite werden nicht in die Untersuchung mit einbezogen),
- Anpassung der Wirtschaftlichkeitsuntersuchung auf Basis der angepassten Infrastruktur.

Einsatz von wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen

Als Alternative zu batterieelektrischen Fahrzeugen (BEMU), die in der bereits angefertigten Studie angesetzt wurden, soll zudem der Betrieb mit wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen (FCMU) untersucht werden.

Zum Untersuchungsraum des Bayerwaldnetzes gehören die Relationen:

- RB 35: Plattling – Bayerisch Eisenstein (via Zwiesel),
- RB 36: Zwiesel – Grafenau,
- RB 37: Zwiesel – Bodenmais und
- RB 38: Gotteszell – Viechtach.

Der in der BEMU-Untersuchung zugrunde gelegte Fahrplan wird auch für die Untersuchungen zum Betrieb mit FCMU-Fahrzeugen unterstellt.

Die anzusetzenden Referenzfahrzeuge wurden im Vorfeld mit dem Auftraggeber abgestimmt. Dabei wurde sich auf Fahrzeugtypen zweier Hersteller verständigt, welche bereits Fahrzeuge für den deutschen Markt anbieten. Es wurde hierbei mit dem Auftraggeber abgestimmt, jeweils ein „langes“ (ca. 55 m bis 57 m Länge) und ein „kurzes“ (ca. 45 m bis 47 m) Fahrzeug zu untersuchen, um die Bandbreite der am deutschen Markt verfügbaren Fahrzeuge bestmöglich abzubilden. Im Rahmen dieses Projektes wurden die notwendigen Fahrzeugeingangsdaten bei den Herstellern angefragt.

Mithilfe fahrdynamischer Simulationen wird geprüft, ob die entsprechenden FCMU-Referenzfahrzeuge die vorgegebenen Fahr- und Umlaufzeiten einhalten

können. Hierbei wird auch ein durchgehender Betrieb der RB 35 bis nach Klatovy (CZ) untersucht. Die Simulationen für einen robusten, pünktlichen und störungsfreien Fahr(gast)betrieb erfolgen mit der kommerziellen Betriebs-simulationssoftware OpenTrack (www.opentrack.ch) im Zusammen-wirken mit energetischen Berechnungen.

In diesem Rahmen wird zudem die technisch und betrieblich notwendige Infrastruktur (Betankungseinrichtungen) ermittelt und untersucht.

Auf Basis der beim Auftragnehmer vorliegenden Kostensätze (Fahrzeug-, Infrastruktur- und Kraftstoffkosten) findet eine Betrachtung der wirtschaftlichen Aspekte statt. Im Rahmen eines vereinfachten Lebenszyklusmodells wird die Wirtschaftlichkeit eines Einsatzes von FCMU-Fahrzeugen im Bayerwaldnetz vergleichend zur Bestandstechnologie mit Dieselantrieb und dem Einsatz von BEMU-Fahrzeugen bewertet.

Hinweis:

Im Rahmen dieser Studie wird der Begriff „Batterie“, der allgemein lediglich einen nicht wieder aufladbaren chemischen Energiespeicher beschreibt, entsprechend allgemeiner Gepflogenheiten als Synonym für den wieder aufladbaren „Akkumulator/Akku“ verwendet.

2 Technologiebeschreibung

2.1 Dieseltriebwagen (Diesel Multiple Unit – DMU)

Auf die Technologie der Dieseltriebwagen wurde bereits im Ausgangsbericht ausführlich eingegangen. Daher soll an dieser Stelle auf den Bericht (2022-12-19 BEG Bayerwald Bericht_2022-618350-659.0_fin Kap. 3.1) verwiesen werden.

2.2 Oberleitungs-/Batterie-Hybridtriebwagen (Battery Electric Multiple Unit – BEMU)

Auf die Technologie der Oberleitungs-/Batterie-Hybridtriebwagen wurde bereits im Ausgangsbericht ausführlich eingegangen. Daher soll an dieser Stelle auf den Bericht (2022-12-19 BEG Bayerwald Bericht_2022-618350-659.0_fin Kap. 3.2) verwiesen werden.

2.3 Wasserstoff-/ Batterie-Hybridfahrzeuge (Fuel Cell Multiple Unit – FCMU)

2.3.1 Charakterisierung der Technologie

Wasserstoff-/Batterie-Hybridfahrzeuge sind technisch Elektrotriebwagen, die ohne Fahrleitung verkehren können. Die Energieversorgung erfolgt auf diesen Strecken, ähnlich wie bei dieselektrischen Fahrzeugen, durch Umwandlung eines chemischen Energieträgers in elektrische Energie. Im betrachteten Fall handelt es sich um Wasserstoff – ein Gas, welches auf mehrere Arten hergestellt werden kann.

Wirklich CO₂-neutral ist dies aktuell nur durch Elektrolyse von reinem Wasser unter Verwendung elektrischer Energie am Markt verfügbar. Dies kann durch Sektorenkopplung mit erneuerbaren Energien gut umgesetzt werden. Eine Erzeugung mittels Elektrolyse mit dem aktuellen deutschen Strommix ist jedoch CO₂-intensiver als der Dieselbetrieb. Aufgrund der geringen Dichte von Wasserstoff muss dieser zunächst verdichtet und in dieser Form gelagert werden. Auch die Betankung des Fahrzeugs findet unter Hochdruck statt. Die anschließend in der Brennstoffzelle erzeugte Elektroenergie kann dann für die Versorgung des Fahrzeugs verwendet werden. Eine große Batterie zur Zwischenspeicherung ist immer notwendig, um die aus der Traktionsanforderung resultierende Dynamik der Leistungsanforderung nicht direkt an die Brennstoffzelle weiterzugeben. Aufgrund der zweistufigen Wandlung der elektrischen Energie im Erzeugungsprozess und im Fahrzeug und der damit verbundenen Verluste ist eine Betrachtung der Energieerzeugung in diesem Fall besonders ausschlaggebend.

Wasserstoff-/Batterie-Hybridfahrzeuge wandeln in einer Brennstoffzelle die im Wasserstoff gespeicherte Energie in Kombination mit Luftsauerstoff im Prozess der sogenannten kalten Verbrennung in elektrische Energie um. Diese wiederum wird dann in einem Elektromotor in mechanische Energie umgewandelt. Abgas ist Wasserdampf bzw. kondensiertes Wasser. Da in einem elektrischen Netzwerk

immer eine ausgeglichene Energiebilanz zwischen Leistungsangebot und -bezug herrschen muss, Brennstoffzellen jedoch zur Reduzierung der Alterungserscheinungen immer möglichst in einem konstanten Leistungsbereich belastet werden¹, muss für den ständig schwankenden Leistungsbedarf ein Zwischenspeicher integriert werden. Insbesondere bei Traktionsspitzen übernimmt dieser die wechselnden Lasten und stellt so die volle Fahrzeugleistung bereit, die deutlich über jener der eigentlichen Brennstoffzellen liegt. Hierzu verfügt der Wasserstoff-/Batterie-Hybrid über Batterien. Zudem kann so die Brennstoffzelle insgesamt leistungsschwächer dimensioniert werden.

Leistungsfähige Brennstoffzellen sind für den nutzbaren Betrieb als Stapel aus mehreren Zellen aufgebaut, von denen jede einzelne für sich eine Brennstoffzelle darstellt. Diese Stapel werden Stacks genannt, die einzelnen Zellen sind darin in Reihe geschaltet. Die Stapelung ist notwendig, um eine ausreichend hohe Spannung am Systemausgang des Stacks bereitstellen zu können. Eine Alterung tritt bei Brennstoffzellen maßgeblich an der protonenleitenden Membran im Inneren der Zelle auf. Bei der Instandhaltung werden deshalb vor allem die Zellmembranen überarbeitet bzw. getauscht, die Zellumgebung kann bestehen bleiben. Die Standdauer der Zellmembran wird im Rahmen dieser Studie als Lebensdauer bezeichnet.

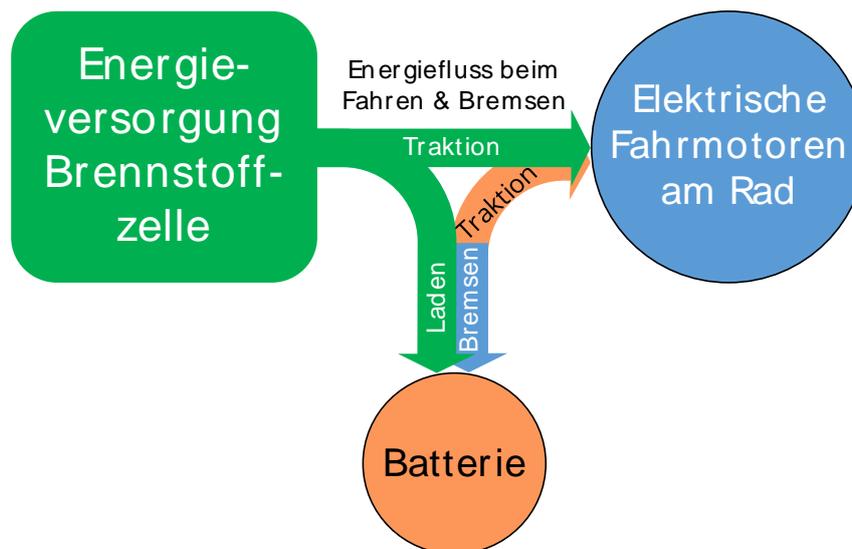


Abbildung 1: Antriebsstrang eines Wasserstoff-/Batterie-Hybrid²

Traktion

Der Leistungsbedarf wird durch ein Zusammenspiel der Batterie und der Brennstoffzelle (BZ) gedeckt. Vor allem bei Leistungsspitzen für Beschleunigungsphasen werden dabei große Anteile aus der Batterie entnommen, da die Leistung

¹ O. Uluc, „Wasserstoff als Energieträger, Ballard Power Systems,“ in DMG Seminar E1, Berlin, 2018

² Grafik: Wittemann, TU Dresden

der BZ kleiner ist als jene des Antriebes. In traktionsarmen Phasen wird die Batterie wieder aus der BZ aufgeladen. Der benötigte Wasserstoff wird in Tanks mitgeführt, die unter mehreren 100 bar Druck (meist 350-Bar-Systeme, Steigerungen auf 500 Bar und 700 Bar angestrebt) stehen und den Wasserstoff so in großen Mengen speichern können.

Ist die Dynamikbatterie über einen bestimmten Ladezustand hinaus geladen und es wird nicht ausreichend Leistung für die Traktion oder/und die Hilfsbetriebe im Fahrzeug abgenommen, um die bereitgestellte Leistung der BZ aufzunehmen, wird die BZ in ihrer Leistung gedrosselt bzw. sogar abgeschaltet, da sonst ein Überangebot an Leistung zur Verfügung stehen würde. Dieser Vorgang und das erneute Hochfahren führen zu einer verstärkten Alterung der BZ und sollten deshalb durch eine prädiktive Leistungsregelung im Fahrzeug in der Häufigkeit reduziert bzw. wann immer möglich vermieden werden.

Bremsen

Das Fahrzeug kann die Bremsenergie rekuperieren. Sie wird für alle Verbraucher im Fahrzeug bzw. bei nicht voll aufgeladener Batterie zum Laden derselben genutzt. Nicht benötigte Energie wird in Bremswiderständen (wenn vorhanden) verschleißfrei oder in Reibungsbremsen verschleißbehaftet in Wärme gewandelt. Bei in Betrieb befindlicher BZ lädt diese während des Bremsvorgangs die Batterie zudem weiter auf. Sollte die Leistungsbilanz durch die Bremsleistung einen Überschuss bilden und kein Abnehmer vorhanden sein (z. B. eine zu ladende Dynamikbatterie bzw. die Hilfs- und Komfortverbraucher), so wird die BZ in ihrer Leistung gedrosselt bzw. sogar abgeschaltet.

2.3.2 Fahrzeugbeispiele Wasserstoff-/Batterie-Hybrid

Alstom iLint

Der Fahrzeugtyp Alstom iLint war seit 2018 bis Mai 2020 im planmäßigen Fahrgasteinsatz mit zwei Vorserienfahrzeugen in Norddeutschland zwischen Buxtehude und Bremervörde. Dort wurden durch die Prototypen in 530 Tagen ca. 180.000 Fahrzeug-km zurückgelegt³. In den Jahren 2019 und 2021 haben die Vorserienfahrzeuge des iLint auch Testfahrten in Bayern absolviert. Er basiert auf der Dieseltriebwagen-Plattform Coradia Lint der Firma Alstom. Die PowerPacks des Fahrzeugs wurden durch Elektromotoren und Batterien ersetzt und um Drucktanks, Stromrichter und die Brennstoffzellen auf dem Dach und unter dem Fahrzeug erweitert. Die Beschleunigungswerte entsprechen annähernd jenen von vergleichbaren Dieseltriebzügen desselben Herstellers.

³ https://www.kreiszeitung-wochenblatt.de/buxtehude/c-panorama/positive-ergebnisse-mit-dem-weltweit-ersten-wasserstoffzug_a167651 und <https://www.golem.de/news/coradia-ilint-alstoms-brennstoffzellenzuege-bewaehren-sich-1907-142626.html>, zuletzt abgerufen am 04.08.2020.



Abbildung 2: Bsp. Alstom iLint⁴

Der Fahrzeugtyp wurde im Jahr 2018 außerdem in einer Anzahl von 27 (Teil-Betriebsaufnahme war Ende 2022⁵) durch die Tochtergesellschaft fahma des Rhein-Main-Verkehrsverbunds (RMV) für das Taunusnetz bestellt. Niedersachsen hat 14 Fahrzeuge für den Betrieb im Weser-Elbe-Netz (Teil-Betriebsaufnahme war Ende 2022⁶) bestellt. Die Betriebsaufnahmen liefen hierbei aufgrund technischer, organisatorischer und betrieblicher Rahmenbedingungen nicht ohne größere Herausforderungen ab, die aber zumindest im Netz Elbe-Weser durch das Vorhalten der vorhandenen Bestandsflotte gut aufgefangen werden konnten. Im Taunusnetz sind auch mit Entstehung des Berichts noch immer Fahrzeug-, Personal- und daraus folgend Fahrtausfälle an der Tagesordnung. Eine Quelle⁷ aus dem Mai 2023 beschreibt die Hürden detailliert.

Die Fahrzeuge verfügen über ca. 150 Sitzplätze, sind ca. 54,3 m lang und haben eine Höchstgeschwindigkeit von 140 km/h bei einer Leistung von 2x 367 kW⁸. Die elektrische Energie stellen zwei PEM Brennstoffzelleneinheiten (PEM – Proton Exchange Membrane Fuel Cell) auf dem Dach, jeweils bestehend aus mehreren BZ-Stacks, bereit. Diese bringen in Zusammenspiel mit zwei Fahrzeugbatterien die nötige Traktionsleistung auf. Nach Herstellerangaben haben die BZ je eine Leistung von 200 kW⁸, der Energieinhalt der zwei Batterien von

⁴ Foto: Alstom

⁵ <https://www.alstom.com/de/press-releases-news/2019/5/rmv-tochter-fahma-bestellt-groesste-brennstoffzellenzug-flotte-der-welt>, zuletzt abgerufen am 11.10.2023.

⁶ https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2022/11/2.-Plattform-Schiene_Einsatz-von-Brennstoffzellenzuegen-in-Niedersachsen_Nawrocki-LNVG.pdf, zuletzt abgerufen am 11.10.2023.

⁷ <https://www.hessenschau.de/wirtschaft/pannen-und-personalausfaelle-neuer-aerger-bei-rmv-wasserstoffzuegen-im-taunus-v1,wasserstoffzuege-taunus-104.html>, zuletzt abgerufen am 11.10.2023.

⁸ <https://www.cleantinking.de/alstom-h2-statt-diesel-verkehrswende-wasserstoffzug-coradia-ilit/>, zuletzt abgerufen am 11.10.2023.

Akasol liegt bei insgesamt 222 kWh⁸. Ca. 260 kg Wasserstoff⁹ sorgen für eine Reichweite im Bereich der Dieseltriebzüge zwischen 800 km und 1000 km pro Tankfüllung. Eine Überarbeitung der Brennstoffzellenmembran hat nach Aussage des Fahrzeugherstellers nach 15.000 h (~20.000 h Betriebsstunden des Zuges) zu erfolgen, dies entspricht ca. 4 bis 5 Jahren. Hersteller der Brennstoffzellen ist Hydrogenics.

Siemens Mireo Plus H



Abbildung 3: Bsp. Siemens Mireo Plus H¹⁰

Das Fahrzeugkonzept basiert auf der Mireo-Plattform der Firma Siemens. Ein Prototyp für einen Einsatz in Bayern existiert bereits und wurde bereits im September 2023 auf einer Testfahrt im Allgäu eingesetzt (siehe Abbildung 3), die Fertigung der nötigen Brennstoffzellen und des gesamten Fahrzeugs entspricht jedoch noch nicht abschließend der Serienfertigung. Als Wasserstofffahrzeug

⁹ Böhm et al. Review and comparison of worldwide hydrogen activities in the rail sector with special focus on onboard storage and refueling technologies, abrufbar unter https://elib.dlr.de/188112/1/Böhm%20et%20al_2022_Review%20and%20comparison%20of%20worldwide%20hydrogen%20activities%20in%20the%20rail%20sector_final.pdf, zuletzt abgerufen am 11.10.2023.

¹⁰ Foto: Florian Liese, Bayerisches Staatsministerium für Wohnen, Bau und Verkehr.

wird der Mireo in der Variante „Plus H“ angeboten. Reine Oberleitungs-Fahrzeuge der Mireo-Plattform befinden sich bereits im Planbetrieb, BEMU der Plattform sollen Ende 2023 in Betrieb gehen.

Das Fahrzeug verfügt über zwei Traktionsanlagen mit den jeweils zugehörigen Batterien und BZ und kann je nach Notwendigkeit im Netz für Geschwindigkeiten von 140 km/h bis 160 km/h bestellt werden. Es wird als 2-Wagen-Fahrzeug mit ca. 120 bzw. 3-Wagen-Fahrzeug mit ca. 165 Sitzplätzen angeboten - und soll dann je nach Ausstattung über bis zu 600 km bzw. 900 km Reichweite verfügen¹¹. Neuere Pressemeldungen sprechen sogar von 1000 km bis 1200 km Reichweite (für das 2-Wagen-Fahrzeug, Länge ca. 46,6 m)¹². Es sind nach Angaben des Herstellers ähnliche Parameter für Brennstoffzellen und Batterien wie beim iLint installiert, wobei die Batteriegröße projektspezifisch angepasst werden kann.

Angestrebt wird nach Aussage des Brennstoffzellenanbieters Ballard¹³, die notwendige Überarbeitung der Brennstoffzellenmembran erst nach circa 30.000 h¹⁴ (~40.000 h Betriebsstunden des Zuges) durchzuführen, dies entspricht 7 bis 9 Jahren, sodass in der vorliegenden Studie 24.000 h angesetzt wurden.

Die Firmen Siemens und DB AG haben im November 2020¹⁵ verkündet, dass sie ab 2024 ein Fahrzeug des Typs Mireo Plus B auf der Strecke zwischen Tübingen, Horb und Pforzheim mit einer durch die DB bereitgestellten Tankstelle erproben wollen unter dem Projektnamen H2goesRail. Dies stellt den öffentlich geförderten Schritt in die reale Fahrzeugumsetzung der Siemens-Plattform-Abwandlung für Wasserstoff-/ Batterie-Hybridfahrzeuge dar. Eine ähnliche Erprobung soll auch in Bayern ab Mitte 2024 im Fahrgastbetrieb¹² für 30 Monate auf zwei Linien ab Augsburg erfolgen.

Für das Streckennetz der Heidekrautbahn der Niederbarnimer Eisenbahn (NEB) hat Siemens im Juni 2022¹⁶ den Zugschlag zur Lieferung von sieben Serienfahrzeugen des Typs Mireo Plus H erhalten. Diese sollen eine Höchstgeschwindigkeit

¹¹ J. Steinbauer, „Mireo - Ein starker Zug wird jetzt noch stärker,“ München, 2019.

¹² <https://press.siemens.com/global/de/pressemitteilung/siemens-mobility-absolviert-erste-testfahrten-mit-wasserstoff-zug-bayern>, abgerufen zuletzt am 11.10.2023.

¹³ <https://www.electrive.net/2022/09/27/stadler-ordert-bz-module-fuer-ersten-h2-zug-in-den-usa/>, abgerufen zuletzt am 11.10.2023.

¹⁴ O. Uluc, „Wasserstoff als Energieträger, Ballard Power Systems,“ in DMG Seminar E1, Berlin, 2018.

¹⁵ https://www.deutschebahn.com/de/presse/pressestart_zentrales_uebersicht/Deutsche-Bahn-und-Siemens-starten-ins-Wasserstoff-Zeitalter-5735960, abgerufen zuletzt am 23.11.2020.

¹⁶ <https://www.neb.de/aktuelles/details/erste-zuege-mit-wasserstoffantrieb-fuer-die-metropolregion-berlin-brandenburg/>, abgerufen zuletzt am 11.10.2023.

von 160 km/h erreichen und dort ab 2024 zum Einsatz kommen.

Stadler Flirt H2 für die San Bernardino County Transportation Authority

Dieser Fahrzeugtyp wird als Normalspurfahrzeug unter Nutzung des größeren Lichtraumprofils für die San Bernardino County Transportation Authority (SBCTA) in Kalifornien, USA entwickelt. Das Fahrzeug ist auf Basis der Flirt-Plattform ausgeführt und wird ab 2024 in Betrieb genommen¹⁷, zudem besteht eine Option über vier weitere Fahrzeuge.



Abbildung 4: Bsp. Stadler H₂-Triebzug für die SBCTASBCTA auf der InnoTrans 2022,¹⁸

Das Fahrzeug verfügt über drei Wagenkästen, wobei die Brennstoffzellen und Dynamikbatterien sowie die gesamte Wasserstofftechnik inkl. der Wasserstofftanks in einem Antriebswagenkasten in der Mitte des Fahrzeugs untergebracht sind, der sich zwei Jacobs-Drehgestelle mit den angetriebenen Endwagen teilt. Damit ist die Wasserstofftechnik räumlich von den Passagierabteilen des Zugs getrennt, wobei es einen Durchgang durch den vom Hersteller als Power Pack bezeichneten Wagenkasten zwischen den beiden Endwagen gibt. Die Druckbehälter sollen ausreichend Wasserstoff mitführen können, sodass einmaliges Tanken pro Tag für den Fahrzeugumlauf von ca. 460 km bei einer Höchstgeschwindigkeit von 127 km/h ausreichend ist¹⁹. Die maximale Reichweite soll bei ca. 700 km liegen. Das Fahrzeug verfügt über 116 Sitzplätze. Hersteller der

¹⁷ <https://www.stadlerrail.com/de/media/article/flirt-h2-sbcta-und-stadler-staerken-den-nachhaltigen-schiennenverkehr-in-den-usa/1142/>, zuletzt abgerufen am 11.10.2023.

¹⁸ Von Nelso Silva from Porto, Portugal - Stadler Flirt H2, CC BY-SA 2.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=123603944>, zuletzt abgerufen am 11.10.2023.

¹⁹ <https://www.stadlerrail.com/de/flirt-h2/details/>, zuletzt abgerufen am 11.10.2023.

Brennstoffzellenmodule ist Ballard¹³, wobei die Brennstoffzellen gemäß Quelle²⁰ 100 kW leisten, wovon sechs bestellt wurden und je drei pro Fahrzeug installiert sein sollen²¹. Das Fahrzeug verfügt über 700 kW Antriebsleistung und max. 1450 kW dynamische Bremsleistung.²² Außerdem ist der Zug für den Betrieb bei hohen Umgebungs-temperaturen von bis zu 49 Grad Celsius (120 Grad Fahrenheit) geeignet.

Das Fahrzeug ist für einen Einsatz im normalspurigen Eisenbahnnetz in Europa aufgrund des Lichtraumprofils nicht geeignet, die Wasserstoff- und Fahrzeugtechnologie kann jedoch übertragen werden.

2.3.3 Auslegungskriterien für H₂-Fahrzeuge

Bei konventionellen Antrieben wie der Elektro- oder Dieseltraktion kann im Allgemeinen von einer zeitlich für den normalen Traktionsbetrieb ausreichend langen (kurzzeitig mögliche Traktionsleistung meist höher als sogenannte Dauerleistung) und unabhängigen Verfügbarkeit der angegebenen Leistungsfähigkeit ausgegangen werden. Bei dem Dieselfahrzeug setzt dies lediglich eine ausreichende Menge an mitgeführtem Kraftstoff voraus. Dies führt zu einer im Rahmen des Fahrplans und im Horizont eines Umlaufs uneingeschränkten Einsetzbarkeit der Fahrzeuge. Bei Oberleitungs-/Batterie-Hybriden gilt diese Annahme im Batteriemodus zumindest während des Vorhandenseins ausreichender Speicherenergie. Dies gilt dann im Rahmen der vorgegebenen Reichweite von ca. 60 km bis 80 km (fahrzeugabhängig, in Einzelfällen mehr). Für Wasserstoff-/Batterie-Hybride kann dies aufgrund der Antriebstopologie und Leistungsaufteilung nicht angenommen werden. Ein Grund ist die aus alterungs- und technologischen Gründen bestehende Anforderung eines möglichst konstanten Betriebs der Brennstoffzelle. Ist beispielsweise für einen Beschleunigungsvorgang ein höherer Leistungsbedarf erforderlich als in die BZ bereitstellen können, so wird dieses Leistungsdefizit durch einen chemischen Energiespeicher (Batterie/ Akkumulator) mit begrenztem Energieinhalt bereitgestellt. Diese Begrenzung führt zu dem Umstand, dass die zeitlich begrenzt lieferbare Traktionsleistung weit über der der Brennstoffzelle liegt (bspw. iLint: max. Traktionsleistung 734 kW + Hilfs- und Komfortbetriebe im oberen zweistelligen kW-Bereich vs. ca. 400 kW BZ-Leistung). Der Zeitraum für die Bereitstellung der zusätzlichen Leistung liegt, je nach Technologie des Energiespeichers, Energieinhalt und Abgabeleistung und unter Voraussetzung einer vorherigen vollständigen Ladung des Speichers, bei maximal 15 Minuten. Dies lässt sich auf Basis gängiger C-Faktoren von im Traktionsbereich eingesetzten Energiespeichern abschätzen. Hieraus resultiert,

²⁰ <https://www.bahnonline.ch/23440/flirt-h2-sbcta-und-stadler-staerken-den-nachhaltigen-schiennenverkehr-in-den-usa/>, zuletzt abgerufen am 11.10.2023.

²¹ <https://fokus-oev-schweiz.ch/2023/03/27/fachmedienkonferenz-2023-stadler-rail-flirt-h2/>, zuletzt abgerufen am 11.10.2023.

²² Stadler Datenblatt Flirt H2 SBCTA, abrufbar unter https://www.bahnonline.ch/wp-content/uploads/2022/09/Datenblatt-FLIRT-H2_Stadler_9-22.pdf, zuletzt abgerufen am 11.10.2023.

dass nach Ablauf dieser Zeit der gesamte Leistungsbedarf des Fahrzeugs durch die BZ gedeckt werden muss. Diese liegt bei bisherigen Anwendungen weit unterhalb der gesamten Fahrzeugleistung (Traktion + Hilfsbetriebe, s. o.). Darüber hinaus ist eine gewisse Regenerationszeit notwendig, um die Energiespeicher aus der BZ wieder aufzuladen. Das Aufladen kann selbstredend nur dann erfolgen, wenn der gesamte Leistungsbedarf im Fahrzeug unterhalb der von der BZ abgegebenen, konstanten Leistung liegt. Aufgrund der bereits beschriebenen, wesentlich geringeren Brennstoffzellenleistung im Verhältnis zur Gesamtfahrzeugleistung kann, selbst im Bereich niedriger Leistungsanforderungen aller Verbraucher im Fahrzeug, von einer Wiederauflade- bzw. Regenerationszeit der Batterie ausgegangen werden, die weit über 15 Minuten liegt, wenn diese bis an die untere Grenze entladen wurde. Dieser Wert lässt sich nicht auf die Betankungszeit mit Wasserstoff oder ein Aufladen an einer externen elektrischen Energiequelle übertragen, sondern charakterisiert nur die Wiederauflade-Zeit einer leeren Batterie aus der BZ bzw. Wasserstoff.

Soll ein Wasserstoff-/Batterie-Hybridfahrzeug eine Strecke entsprechend einem definierten Fahrplan befahren, so ergibt sich eine erforderliche Geschwindigkeit sowie eine notwendige Beschleunigung. Hierauf basierend kann ein Leistungs- und Energiebedarf abgeschätzt werden, der über dem zeitlichen Verlauf betrachtet eine gewisse Mindestdimensionierung von BZ und Energiespeicher erfordert. Daraus ergeben sich unter zusätzlicher Berücksichtigung nicht streckenspezifischer Anforderungen (Hilfsbetriebe- und Komfortenergiebedarf, Aufenthaltszeiten etc.) Kriterien für die Auslegung der Antriebs- und Energieversorgungsanlage.

Anforderungen aus dem Energiebedarf

- Bereitstellung von Traktionsleistung über einen Zeitraum von einigen Minuten (erhöhter Traktionsenergiebedarf) aufgrund von:
 - hohem Streckenwiderstand (Steigungen, Tunnel, Bögen etc.),
 - hohem Fahrwiderstand bei hohen Geschwindigkeiten,
 - Beschleunigung der Fahrzeugmassen.
- Bereitstellung von Traktionsenergie (nach Abzug von rekuperierter Energie) für eine gesamte Fahrt bzw. Umlauf,
- Bereitstellung von Hilfsbetriebeenergie über den gesamten Zeitraum der Fahrt und des Stillstands im Umlauf.

Anforderungen aus dem Leistungsbedarf

- Bereitstellung von Leistungsspitzen aus der Traktionsanforderung zur Ermöglichung des Beschleunigungsvermögens,
- Aufnahme von Leistungsspitze der Rekuperation zur Erhöhung der Energieeffizienz,
- Bereitstellung von Traktionsleistung über einen längeren Zeitraum (erhöhter Traktionsenergiebedarf) aufgrund von: hohem Streckenwiderstand durch hohe Steigungen (im Bayerwaldnetz: Klatovy – Špičák).

Alle genannten Anforderungen führen zwangsläufig zu einer entsprechend erforderlichen Mindestdimensionierung. Aufgrund von begrenzt möglicher

Zusatzmasse bzw. Einbauvolumen stellt die tatsächliche Auslegung ein multi-kriterielles Problem dar. Nur in seltenen Fällen findet eine genaue Fahrzeugdimensionierung zur Erfüllung einer konkreten Transportaufgabe statt. Vielmehr wird aus bestehenden Konfigurationen eine passende gewählt. Die Prüfung, ob die Transportaufgabe mit der favorisierten Wasserstoff-/ Batteriehybrid-Konfiguration zu bewältigen ist, erfordert eine spezielle Untersuchung. Dabei sind neben der maximalen Leistungsfähigkeit auch entsprechende zeitabhängige Leistungsfähigkeiten zu berücksichtigen. Eine unpassend gewählte Konfiguration der Betriebsmittel, insbesondere der Batterie, kann zu einer Leistungsrosselung führen. Dies wirkt sich negativ auf das Beschleunigungsvermögen und die Höchstgeschwindigkeit und somit den Fahrplan aus.

Lastprofile der Brennstoffzellensysteme

Aufgrund der im Verhältnis zur Fahrdauer kurzzeitigen und hohen Leistungsanforderungen, bspw. beim Beschleunigen, ist eine dynamische Belastung der Brennstoffzelle zunächst eine Überlegung wert. Dies würde die erforderliche Leistungsfähigkeit des Energiespeichers erheblich reduzieren und damit Bauraum und Masse reduzieren. Dennoch ist dies aus zellchemischer Sicht keine erstrebenswerte Betriebsstrategie. Dynamische Laständerungen führen zu lokalen Unterversorgungen und beschleunigen die Degradation der Zelle, was wiederum zu einer Verkürzung der Lebensdauer führt.²³

Aus diesem Grund ist eine möglichst konstante Belastung wünschenswert. Die erforderliche Leistung kann sich durch Mittelung des Nettoenergiebedarfs (abzüglich Rekuperation) über der Fahrzeit (zzgl. eines Zuschlags) ergeben. Auch eine vollständige Abschaltung der BZ ist aus Gründen der Zellchemie nicht erstrebenswert (Start-Stopp-Zyklen).²⁴ Hierbei ist vielmehr eine Drosselung der Abgabeleistung zu empfehlen (Ruhebetrieb). Diese sollte allerdings mindestens 10 % der Nennleistung betragen.

Lastprofile der Dynamikbatterien

Elektrochemische Energiespeicher, im allgemeinen Sprachgebrauch auch Batterien genannt, besitzen eine für den Einsatz in Wasserstoff-/Batterie-Hybriden geeignete Belastungscharakteristik. Dies bedeutet, sie erlauben schnelle Lastwechsel und eine entsprechende Leistungsfähigkeit in der Energieaufnahme sowie -abgabe. Die Zellspannung dient dabei als Indikator für den Ladezustand.²⁵ Aufgrund des speziellen Lade- und Entladeverhaltens ist eine eigene Regelung

²³ Dynamischer Betrieb von PEM-Brennstoffzellen, ZSW (abgerufen am 28.08.2020) <https://www.zsw-bw.de/projekt/h2-und-brennstoffzellen/dynamischer-betrieb-von-pem-brennstoffzellen.html>

²⁴ STRESS – Start-Stop-Alterung von PEM Brennstoffzellen, Fraunhofer ISE (abgerufen am 28.08.2020) <https://www.ise.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/stress.html>

²⁵ S. 299, Michael Sterner Et al., Energiespeicher, Springer 2017

nötig. Je nach Anwendung kann außerdem eine Spannungsanpassung erforderlich sein, um eine konstante nutzbare Gleichspannung bereitzustellen²⁶. Bemerkenswert sind die bei Lithium-Ionen-Zellen erreichbaren Lade- und Entladeleistungen. Diese können, je nach Zellchemie, bei konstant 2-3 C (Lade- bzw. Entladerate C bezogen auf den Nennenergieinhalt) liegen²⁷. Kurzfristig sind abhängig von der Zellchemie auch noch deutlich höhere C-Raten möglich. Herausfordernd sind allerdings die thermische Konditionierung sowie die Überwachung im Hinblick auf Sicherheit und Lebensdauer. Durch eine schonende Belastung mit geringeren Leistungen durch das Vermeiden von „Stressfaktoren“ kann die Lebensdauer der Batterien verlängert werden.²⁸

Aufgrund der Größenunabhängigkeit des C-Faktors sind Leistung und Energie dahingehend verkoppelt, dass eine Verdoppelung der notwendigen Fahrzeugleistung, beispielsweise resultierend aus der Leistungsanforderung einer Strecke, auch eine Erhöhung des Energieinhalts der Batterien und somit von deren Masse und deren Kosten zur Folge hat. Hieraus lässt sich ableiten, dass Wasserstoff-/Batterie-Hybridfahrzeuge in ihrer Konfiguration sehr stark auf das konkrete Betriebsprogramm einer Strecke zuzuschneiden sind. Dies gilt bei Oberleitungs-/Batterie-Hybridfahrzeugen zwar auch, aber lediglich hinsichtlich des Gesamtenergiebedarfs. Bei bisherigen Diesel- oder Elektrofahrzeugen spielte dies, abgesehen von Ausschlusskriterien wie Höchstgeschwindigkeit, Beschleunigungsfähigkeit o.ä., nur eine sekundäre Rolle.

Bei der Dimensionierung von Wasserstoff-/Batterie-Hybridfahrzeugen spielt zudem die verfügbare Leistung der Batterien, überschlägig hervorgehend aus dem C-Faktor, sowie der maximal nutzbare Energieinhalt eine Rolle. Während die Entladeleistung die verfügbare Fahrzeugleistung determiniert (in Addition zur Brennstoffzellenleistung), bestimmt der Energieinhalt maßgebend die mögliche Dauer der Belastung. Dies bedeutet, dass für eine langanhaltende höhere Belastung, beispielsweise durch langanhaltende Bergfahrten, bei denen der mittlere Gesamt-Leistungsbezug des Fahrzeugs oberhalb der verfügbaren Leistung der Brennstoffzellen liegt, ein „leerlaufen“ der Batterien droht, da dann keine Nachladung der Batterien aus den Brennstoffzellen erfolgen kann. Der Ladezustandsverlauf muss also im Detail für anspruchsvolle Linien, wie sie im Bayerwaldnetz vorhanden sind, explizit untersucht und ein übermäßiges Entladen der Batterien dadurch ausgeschlossen werden. Sind die Batterien vollständig entladen, kann das Fahrzeug nur noch durch die Leistung aus den Brennstoffzellen sowie einen Ladeaufenthalt wieder mit voller Fahrzeugleistung betrieben werden. Ein üblicher Betrieb ohne ausreichend geladene Dynamikbatterie ist somit nicht möglich.

²⁶ S. 299, Michael Sterner Et al., Energiespeicher, Springer 2017

²⁷ S. 298, Michael Sterner Et al., Energiespeicher, Springer 2017

²⁸ S. 301, Michael Sterner Et al., Energiespeicher, Springer 2017

Im Bayerwaldnetz ist vor allem die Linie RB 35 auf dem Abschnitt Klatovy – Špičák eine für diese Auslegung herausfordernde Strecke, bei der geprüft werden muss, ob die vorhandene nutzbare Energiemenge ausreichend ist für eine Bergfahrt bis Špičák. Siehe hierzu detailliert Abschnitt 5.5.1 und beispielhaft Abbildung 11.

3 Infrastruktur für Wasserstoffbereitstellung

3.1 Wasserstoffversorgung

Brennstoffzellenfahrzeuge bieten die Möglichkeit, lokal vollständig emissionsfrei zu verkehren. Ihr Vorteil liegt dabei vor allem in den hohen Reichweiten ohne Notwendigkeit des Nachtankens oder der Nachladung nach jeder Fahrt. Größte Herausforderung ist aktuell die ausreichende und stabile Versorgung mit Wasserstoff. Es gibt dabei verschiedene Verfahren zur Herstellung, die entweder CO₂-neutral (Wasser-bzw. Chloralkali-Elektrolyse mit CO₂-neutralem Strom) oder CO₂-emittierend (Reformation von Erdgas/ anderen Kohlenwasserstoffen, Wasser- bzw. Chloralkali-Elektrolyse ohne CO₂-neutralen Strom) industrielle Anwendung finden. Diese werden meist zentral in großen Anlagen mit hoher Ausstoßmenge angewandt. Elektrolyseure für die Wasser-Elektrolyse sind aber auch dezentral in kleinen Anlagen gleisnah realisierbar. Für die dezentrale Wasserstoffversorgung bietet sich in windreichen Regionen auch eine Sektorenkopplung mit der Erzeugerwirtschaft der Windenergie als Speichermöglichkeit für überschüssige elektrische Energie an.

3.2 Herstellung

3.2.1 Prozesse

Die Herstellung von Wasserstoff basiert heutzutage zu über 90 % auf fossilen Energieträgern. Dies ist für eine angestrebte CO₂ Neutralität nicht förderlich, sofern auch Verfahren zur möglichen CO₂-neutralen Erzeugung vorhanden sind (bspw. Elektrolyse)²⁹. Da die tatsächliche CO₂ Bilanz des per se kohlenstofffreien Wasserstoffs ausschließlich von seiner Erzeugung abhängig ist, muss diesem besondere Beachtung geschenkt werden. Im allgemeinen Sprachgebrauch haben sich unterschiedliche Farben als herkunftsdifferenzierender Bezeichner für Wasserstoff etabliert. Grundsätzlich ist anzumerken, dass chemischer Wasserstoff ein farbloses Gas darstellt³⁰:

²⁹ S.6, Töpler Et al., Wasserstoff und Brennstoffzelle 2. Aufl., Springer 2017

³⁰ <https://www.bmbf.de/de/eine-kleine-wasserstoff-farbenlehre-10879.html> [Zugriff zuletzt am 01. September 2020]

Grüner Wasserstoff: Elektrolytisch hergestellter Wasserstoff. Hierbei wird ausschließlich CO₂-neutraler Strom, vorzugsweise aus erneuerbaren Energiequellen, verwendet.

Grauer Wasserstoff: Durch Umwandlung aus fossilen Brennstoffen gewonnener Wasserstoff. Laut BMBF werden bei Herstellung von 1 kg Wasserstoff durch Dampfreformierung 10 kg CO₂ emittiert.

Türkiser Wasserstoff: Durch die thermische Spaltung von Methan erzeugter Wasserstoff. Der Kohlenstoff wird hierbei als Feststoff gebunden, welcher dadurch eine dauerhafte klimaneutrale Lagerung ermöglicht. Voraussetzung für eine CO₂-neutrale Herstellung ist die Wärmeversorgung des Hochtemperaturreaktors mit erneuerbaren Energien.

Blauer Wasserstoff: Ähnlich wie bei der Herstellung von türkischem Wasserstoff entsteht bei dieser Variante Kohlenstoff. Da dieser allerdings gasförmig vorliegt, ist die Abscheidung und Lagerung komplexer. Zwar existieren Verfahren zur Speicherung (Carbon Capture and Storage CCS), diese wurden aber bis heute noch nicht großtechnisch angewandt. Das Umweltbundesamt legt außerdem einige umwelttechnische Risiken dar, aus denen sich Anforderungen ergeben, „die damit als umfassend und streng zu bewerten“ sind.³¹

Im Folgenden wird eine Übersicht über die Möglichkeiten zur Wasserstoffherstellung gegeben:

Herstellung aus fossilen Energieträgern und Biomasse

Hierbei ist das Verfahren der Dampfreformierung das am häufigsten angewandte. Dabei werden Methan und Wasser unter hohem Druck sowie hoher Temperatur gemischt und in einem zweistufigen Prozess zu Wasserstoff und Kohlendioxid umgewandelt. Der Wirkungsgrad liegt bei 70 %. Ein weiteres Verfahren ist die partielle Oxidation. Feste, flüssige oder gasförmige fossile Energieträger werden dabei unter Zuführung von Wärme und Sauerstoff in einem unterstöchiometrischen Verhältnis (geringerer Anteil an Sauerstoff bei der Reaktion, als zur vollständigen Oxidation notwendig wäre) zu Kohlenmonoxid und Wasserstoff umgewandelt. In einer nachfolgenden Reaktion werden diese anschließend zu Kohlenstoffdioxid und Wasserstoff gewandelt.³²

Herstellung durch Wärmeenergie

Hierbei wird unter Zuführung von Wärmeenergie Wasser in u. a. Wasserstoff gespalten. Die hohe Prozesstemperatur von ca. 2000 °C erschwert die technische

³¹ <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/gewaesser/grundwasser/nutzung-belastungen/carbon-capture-storage#ccs-im-clean-development-mechanism-cdm> [Zugriff zuletzt am 26. Februar 2023].

³² S.6. f, Töpler Et al., Wasserstoff und Brennstoffzelle 2. Aufl., Springer 2017

Prozessführung. Aus diesem Grund werden Katalysatoren und thermische Kreisprozesse verwendet. Der Wirkungsgrad des Gesamtprozesses liegt bei ca. 50 %.³³

Herstellung durch Elektrolyse unter Zuhilfenahme elektrischer Energie

Bei diesem Prozess kann reines Wasser, ggf. mit Zugabe von Kalilauge, zur Spaltung verwendet werden. Es existieren unterschiedliche Elektrolyseur-Technologien³⁴:

- Alkalische Elektrolyseure (80 °C): Spaltung von wässriger Kalilauge bei Wirkungsgraden von bis zu 80 %.
- Membranelektrolyseure (80 °C): Verwendung einer protonenleitfähigen Membran. Geringerer verfahrenstechnischer Aufwand als bei der alkalischen Elektrolyse; interessant für Anlagen mit geringerer Leistung.
- Wasserdampfelektrolyseure mit Betriebstemperaturen von 650-1000 °C. Die Einkopplung von Wärme kann bei diesem Prozess den Bedarf an elektrischer Energie weit reduzieren und somit den auf diese Größe bezogenen Wirkungsgrad erhöhen.

Der grundsätzliche Vorteil der strombasierten Wasserstofferzeugung ist die Möglichkeit zur Verwendung CO₂-neutraler sowie erneuerbar erzeugter elektrischer Energie (sowie ggf. auch erneuerbar erzeugter Wärmeenergie).

Untersuchung der Photokatalyse

In der aktuellen Forschung wird die Herstellung von Wasserstoff durch Sonnenlicht untersucht. Dabei wird einerseits die Abänderung des photosynthetischen Prozesses von Algen und andererseits die Herstellung eines „künstlichen Blatts“ untersucht. Beide Bestrebungen sind zum aktuellen Stand noch weit von einer industriellen Nutzbarkeit entfernt.³⁵ Zudem unterliegt die natürliche Photosynthese bezogen auf den Flächenbedarf bei relativ geringen Wirkungsgraden.

3.2.2 Einbindung erneuerbarer Energien

Die Verwendung erneuerbarer Energien ist einer der zentralen Vorteile der elektrolytischen Erzeugung von Wasserstoff. Eine maßgebende Herausforderung der Energiewende ist dabei die zeitgleiche Verwendung dargebotsabhängiger und erneuerbar erzeugter Energie. Aufgrund der schlechten Planbarkeit der Verfügbarkeit von Wind und Sonne ist eine Speicherung, neben flexiblen Verbrauchern, eine Variante der Nutzung. Eine Möglichkeit stellt dabei

³³ S.8, Töpler Et al., Wasserstoff und Brennstoffzelle 2. Aufl., Springer 2017

³⁴ Dr. W. Schnurnberger, Wasserspaltung mit Strom und Wärme, DLR, 2004

³⁵ S.10.f, Töpler Et al., Wasserstoff und Brennstoffzelle 2. Aufl., Springer 2017

die Wasserstoffherzeugung dar. Durch die damit herstellbare Verbindung des Sektors der Energieerzeugung und demjenigen Sektor, in dem der Wasserstoff verwendet wird, wird von Sektorkopplung bzw. Sektorenkopplung gesprochen. Eine Verwendung könnte beispielsweise in die Wärmeherzeugung oder dem Verkehrssektor gefunden werden.

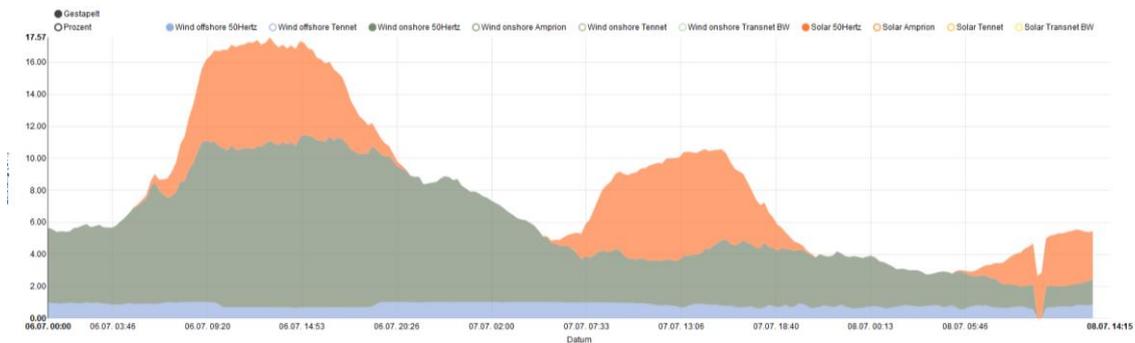


Abbildung 5: Darstellung der schwankenden Verfügbarkeit von Solar- (orange) und Windenergie-Onshore (grün) im Verlauf von zweieinhalb Tagen.³⁶

In Abbildung 5 ist die schwankende Verfügbarkeit von erneuerbarer Erzeugerleistung erkennbar. Es ist allerdings anzumerken, dass bei der strombasierten Elektrolyse ein Zielkonflikt aus Kosteneffizienz durch maximalen Output (möglichst hohe Auslastung während den vollen 24 h des Tages) und ausschließlicher Verwendung erneuerbarer Energien entstehen kann. Darüber hinaus ist auch das ggf. zu entrichtende Netzentgelt für die Nutzung der Übertragungsnetze zu berücksichtigen. Diese können durch die direkte räumliche Verknüpfung von Erzeugung und Verwendung vermieden werden. Im Folgenden werden Beispiele aus der Anwendung und Forschung aus dem Bereich gegeben:

Energiepark Mainz

Der Energiepark Mainz ist das Ergebnis eines Projekts mit dem Ziel des Einsatzes innovativer Technologien zur Erzeugung von Wasserstoff aus erneuerbaren Energien.³⁷ Die seit 2016 im Forschungsbetrieb befindliche Anlage verfügt über einen Netzanschluss an das Stromnetz sowie eine direkte Verbindung zu drei (bis zu vier) Windkraftanlagen. Hierdurch kann die unmittelbare Verwendung von erneuerbarer Erzeugerkapazität ohne Netznutzung sichergestellt werden. Gleichzeitig wird durch den Netzanschluss eine dauerhafte Versorgungsmöglichkeit gewährleistet.

³⁶ Quelle: energy-stats.com

³⁷ <https://www.energiepark-mainz.de/projekt/projektziele/>, zuletzt abgerufen am 26.02.2023

Die Kosten von ca. 17 Mio. wurden zu 50 % gefördert. Es entstand eine Elektrolyseurkapazität von 6 MW bzw. 3,9 MW (Spitzenlast bzw. Dauerlast), welche in der Lage ist, einerseits durch die schnelle Regelbarkeit netzdienliche Maßnahmen zu erbringen (negative Regelleistung) und andererseits bei voller Leistung 90 kg Wasserstoff pro Stunde herzustellen.^{38 39} Der Wasserstoff kann entweder zur Einspeisung in das öffentliche Gasnetz oder zur Befüllung von Trailern verwendet werden. Eine kurzzeitige Speicherung ist ebenfalls möglich. Abbildung 6 und Abbildung 7 stellen die Topologie photographisch und schematisch dar. Eine bereits durchgeführte Evaluation ergab darüber hinaus einen Systemwirkungsgrad von 70 %.

³⁸ <https://www.energiepark-mainz.de/wissen/technische-daten/>, zuletzt abgerufen am 26.02.2023

³⁹ https://www.m-r-n.com/neuigkeiten/2017/20171019-Regionalkonferenz%20Energie%20-%20Umwelt/F3_Aichinger_Mainz%20E-Park.pdf, zuletzt abgerufen am 10.09.2020

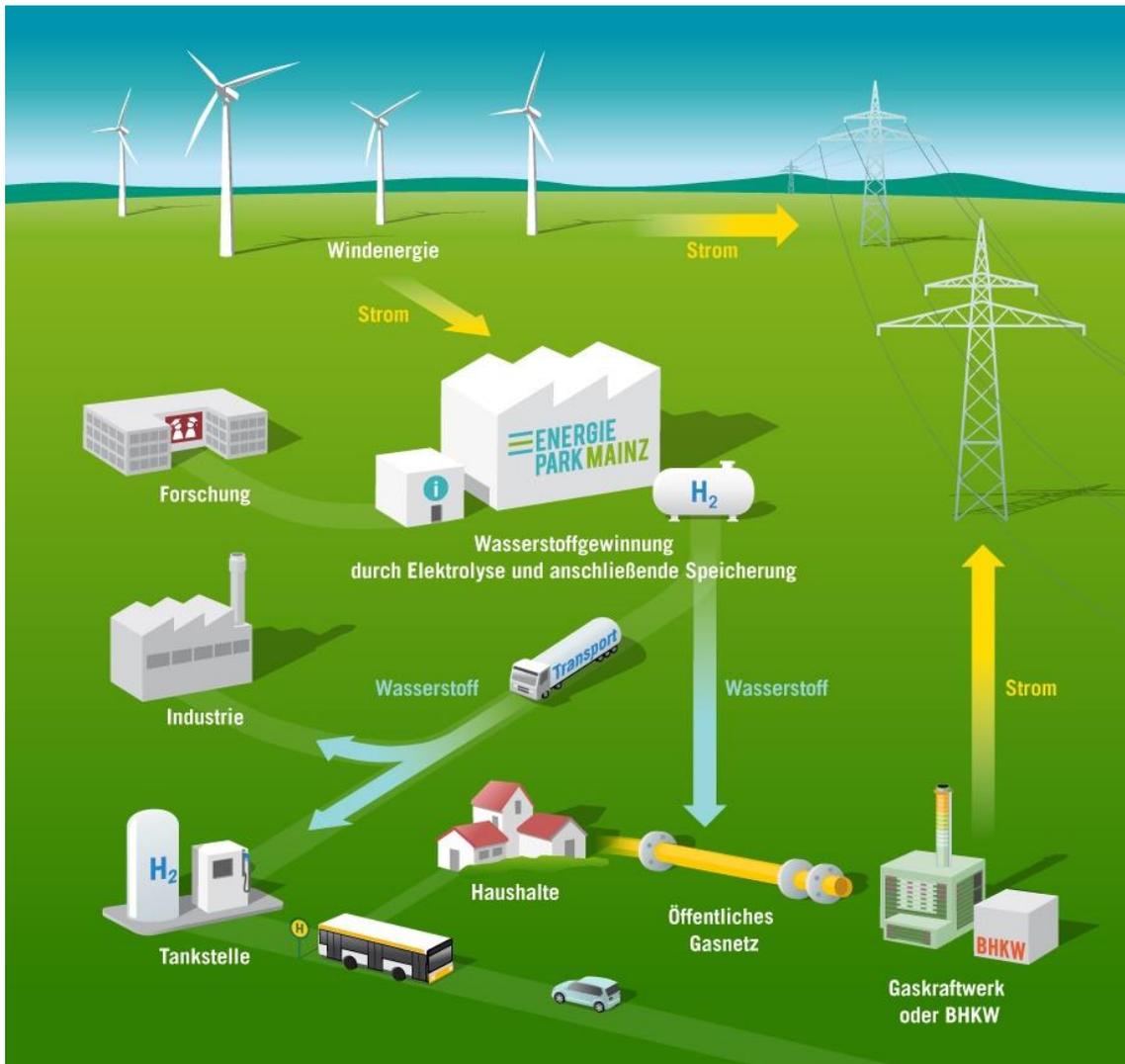


Abbildung 6: Topologie des „Energiepark Mainz“ – Energieversorgungs-
Möglichkeit aus dem öffentlichen Netz ist nicht dargestellt.⁴⁰

⁴⁰ Grafik: energiepark-mainz.de



Abbildung 7: Power to Gas (P2G/PTG) Anlage des „Energiepark Mainz“⁴¹

Aufbau einer regionalen Wasserstoffwirtschaft an der Westküste in SH



Abbildung 8: Energetische und stoffliche Topografie des Projekts „Westküste 100“

⁴¹ Foto: bine.info

Im August 2020 erhielt das Konsortium „Westküste 100“ einen Förderbescheid für den Aufbau einer regionalen Wasserstoffwirtschaft. Mit dem Projektbudget von 89 Mio. Euro, wovon 30 Mio. Euro gefördert werden, soll eine Elektrolysekapazität von 30 MW errichtet werden⁴². Diese soll aus Windenergie Wasserstoff produzieren, welcher für vielfältige Einsatzzwecke verwendet werden soll. Abbildung 8 zeigt die stoffliche und energetische Topografie des Projekts. Dabei ist die Nähe zur Industrie klar erkennbar. Ein interessanter Aspekt ist in diesem Fall auch die Kavernenspeicherung sowie die Methanol-Synthese aus abgeschiedenem CO₂. In diesem Anwendungsfall liegt der Fokus auf der Erzeugung alternativer Flüssigkraftstoffe, der Dekarbonisierung von Industrieprozessen sowie der Einspeisung in das öffentliche Gasnetz.

3.3 Bereitstellung

3.3.1 Aggregatzustände

Die Verteilung des Wasserstoffs kann im gasförmigen oder flüssigen Aggregatzustand erfolgen. Aufgrund der unterschiedlichen Wirkungsgrade der benötigten Verfahren zur Zustandsherstellung gibt es unterschiedliche anwendungsabhängige Bewertungen. Die technischen Möglichkeiten werden im Folgenden erläutert:

Gasförmiger Wasserstoff (GH₂)

Nach dem Allgemeinen Gasgesetz ist der Quotient aus dem Produkt von Druck und Volumen sowie der Temperatur konstant. Dem folgt, dass bei gleichbleibender Temperatur vor und nach der Kompression eine Volumenverkleinerung nur mit einer Druckerhöhung erreicht werden kann. Die hierbei zugeführte Volumenänderungsarbeit geht zu Lasten des Wirkungsgrades des Gesamtprozesses. Da ein geringes Volumen allerdings im Sinne eines wirtschaftlichen Transports der für den Betrieb mitführbaren Wasserstoffmenge ist, wird deutlich, dass es sich hierbei um zwei entgegengesetzte Optimierungsziele handelt. Da ein höherer Druck gleichzeitig auch ein druckfesteres Tanksystem benötigt, ist auch hier keine unbegrenzte Skalierbarkeit vorhanden. Aus Gründen unterschiedlicher Optimierungsziele etablierten sich zwei maßgebliche Druckebenen im Bereich der Wasserstoffverteilung: 350 bar und 700 bar⁴³, teilweise auch 500 bar zur Speicherung in Tankanlagen zur Optimierung des selbstständigen Überströmens.

⁴² <https://www.thb.info/rubriken/single-view/news/wasserstoff-an-der-westkueste.html> zuletzt abgerufen am 10.09.2020.

⁴³ https://www.energieagentur.nrw/netzwerk/brennstoffzelle--wasserstoffwasserstoff--elektromobilitaet/wasserstoffspeicher_distribution_tankstellen, zuletzt abgerufen am 10.09.2020.

Bei der Speicherung wird auf allen Druckebenen aufgrund der positiven Spannungsverteilung auf kugelförmige oder zylindrische Speicher gesetzt⁴⁴. Dies ist bei der konstruktiven Unterbringung der Speicher zu berücksichtigen. Die Typisierung des Speichersystems auf Basis des Drucks ist dabei nicht relevant. Ggf. relevant könnte im Laufe der Lebensdauer hingegen die Anzahl der ertragbaren Lastwechsel sein. Aufgrund des während der Wasserstoffentnahme abfallenden Innendrucks geht jede Entleerung des Tanks mit einer Reduktion der Beanspruchung einher. Dieser Vorgang kann gemeinsam mit der anschließenden Betankung als Zyklus betrachtet werden. Jeder Tank besitzt eine begrenzte Anzahl an ertragbaren Lastwechseln (LW), welche typ- und temperaturabhängig sind. Die Ausführung eines Tanks als Typ-IV-Zylinder begünstigt die Anzahl der ertragbaren Lastwechsel und verlängert somit die Lebensdauer. Bei Typ-IV-Zylindern kann von einer Zyklfestigkeit von 45.000 LW gesprochen werden (sowohl bei tiefen Temperaturen als auch bei Raumtemperatur). Interessant ist hierbei allerdings, dass die ertragbare Zyklenzahl um 24 % reduziert wird, wenn die Temperatur auf 85 °C steigt⁴⁵, was bspw. bei Schnellbetankung eintreten kann.

An dieser Stelle sei außerdem auf die Permeabilität/Durchlassfähigkeit von Werkstoffen für Wasserstoff hingewiesen. Die geringe Molekülgröße des Wasserstoffs führt dazu, dass dieser durch andere Stoffe hindurch diffundieren kann. Der hierfür zulässige Grenzwert nach EG 70/2009 beträgt 12,8 mg/d/Innenvolumen (in Liter). Mit der Annahme einer konstanten Permeationsrate des Grenzwertes wäre ein 700 bar Speichersystem „nach über vier Jahren noch zu 50 % gefüllt“.⁴⁶

Die Druckebenen 350 bar und 700 bar können anhand mehrerer Kriterien verglichen werden. Ursprüngliche Motivation der Druckerhöhung ist die Speicherung von mehr Wasserstoff bei gleichem Volumen. Aufgrund des in der Realität nicht linearen Zusammenhangs von Dichte und Druck ist bei einer Verdoppelung des Drucks nur eine Dichtesteigerung von 67,7 % zu erreichen. Dazu kommt ein steigender Massebedarf zur Herstellung einer Belastbarkeit für höheren Druck. Unter Berücksichtigung dieser Eigenschaft kann abschließend nur von einer 50 %-igen Kapazitätssteigerung bei der Verdopplung von 350 bar auf 700 bar ausgegangen werden. Der Energiebedarf zur weiteren Verdichtung ist allerdings nicht mit Faktor 2 belegt. Für eine Verdichtung auf 350 bar kann mit 12 % Energieaufwand, bezogen auf die chemische Energie des Wasserstoffs, gerechnet werden. Bei 700 bar beträgt Aufwand ca. 15 %.

⁴⁴ S.22, Rosen, Beitrag zur Optimierung von Wasserstoffdruckbehältern, VW AG AutoUni 2017

⁴⁵ S.22, Rosen, Beitrag zur Optimierung von Wasserstoffdruckbehältern, VW AG AutoUni 2017

⁴⁶ S.24, Rosen, Beitrag zur Optimierung von Wasserstoffdruckbehältern, VW AG AutoUni 2017

Flüssiger Wasserstoff (LH2)

Eine Alternative zu GH2 stellt die flüssige Verteilung von Wasserstoff dar. Dies kann durch die Dichte gezeigt werden. Beträgt diese bei atmosphärischem Druck (ca. 1 bar) $0,08 \text{ kg/m}^3$, können bei anderen gasförmigen Drücken Dichten von $23,3 \text{ kg/m}^3$ (350 bar) bzw. 40 kg/m^3 (700 bar) erreicht werden. Findet eine Verflüssigung statt, so beträgt die Dichte bei 1 bar hingegen 70 kg/m^3 . Dies ist Motivation einer kryogenen Speicherung. Aufgrund der geringen Siedetemperatur von -241 °C (1 bar) ist allerdings eine dauerhafte Kühlung und Isolierung erforderlich, welche das Systemgewicht erhöhen⁴⁷. Dies spiegelt sich außerdem auch im energetischen Aufwand zur Verflüssigung wider. Dieser liegt bei ca. 30 %, bezogen auf die chemische Energie des Wasserstoffs⁴⁸.

Da ein Wärmeeintrag auch bei guter Isolation alleine bereits aufgrund der hohen Temperaturdifferenz zur Umgebung unvermeidbar ist, findet eine Verdampfung stets statt. Dies führt nach längerer Zeit zu einer Druckerhöhung im Tank. Diese muss bei Überschreitung eines Schwellwerts durch Abblasen ausgeglichen werden. Abgesehen von sicherheitstechnischen Risiken reduziert dies den Wirkungsgrad sowie die Speicherdauer des Tanks.

Vergleich der unterschiedlichen Transportkonzepte

Die Verflüssigung von Wasserstoff bietet zwar höhere Transportmengen an, benötigt allerdings auch mehr Prozessenergie. Während sich die Speicherung von gasförmigem Wasserstoff als einfach erweist, ist die dauerhafte Isolation von verflüssigtem Wasserstoff ein technisch aufwändiger und verlustbehafteter Prozess. Die Verflüssigung oder Vergasung ist dann ein ggf. notwendiger Zwischenschritt des Auslieferungsprozesses, bspw. an der Tankstelle. Auf einem Eisenbahnfahrzeug, das ggf. aus betrieblichen oder technischen Gründen auch mehrere Tage oder Wochen ohne externe Energieversorgung abgestellt werden können muss, ist dies nahezu nicht möglich.

3.3.2 Verteilungskonzepte bei gleisferner Erzeugung

Gasförmige Verteilung

Mit speziellen Hochdruck-LKW-Trailern (> 350 bar bis 700 bar Druck) würde das Gas auf dem Straßenweg mit perspektivisch verfügbaren CO₂-neutralen LKW zu den gleisnahen Tankstellen transportiert, wo nur noch Druckminderer bzw. Tankanlagen/ Dispenser vorhanden sind. Ein Zeithorizont für die Beförderung der vorgesehenen Hochdrucktrailer ist noch nicht abschließend aufgestellt, jedoch forschen mehrere Hersteller an Brennstoffzellen-/ Batterie-LKW, einzelne Prototypen und Kleinserien sind bereits unterwegs. Es ist damit zu rechnen, dass die Belieferung zunächst mit Diesel betriebenen LKW und Trailern mit niedrigerem

⁴⁷ S.86 f., Eichlseder, Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik, Springer 2008

⁴⁸ S.94, Eichlseder, Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik, Springer 2008

Druck (ca. 500 bar) durchgeführt würde. Die Kapazität der Trailer führt zu häufigerer Belieferung der Tankstellen als mit Flüssigem Wasserstoff oder Trailern für höhere Drücke. Großer Vorteil ist, dass die LKW-Trailer an den Tankstellen auch als Druckspeicher genutzt werden können, sodass sie gefüllten Zustand an der Tankstelle verbleiben und dort mit verhältnismäßig wenig Energie mittels Überströmens bereits Tankvorgänge ermöglichen. Wird der Tankvorgang durch vor Ort befindliche Pumpen beschleunigt, so lassen sich Tankzeiten zusätzlich erheblich reduzieren. Geringere Drucke komprimieren den Wasserstoff auf geringere Dichten und erfordern somit, bei gleicher Masse, ein höheres Volumen. Dem steht allerdings auch ein geringerer Materialaufwand für das Tanksystem, aufgrund der geringeren Druckanforderungen, entgegen. Die häufigeren LKW-Fahrten lassen für diesen Zeitraum vorübergehend einen Anstieg der Kosten und des CO₂-Ausstoßes erwarten. Dies wird in der vorliegenden Studie nicht berücksichtigt.

Flüssige Verteilung

Die flüssige Verteilung ermöglicht aufgrund der höheren Dichte eine höhere Transportmenge pro Fahrt. Entsprechende Quellen geben eine Transportmenge von 4 t pro Trailer an. Dem gegenüber stehen Trailer mit gasförmiger Speicherung, die eine Transportkapazität von ca. 500-1000 kg (je nach Druckebene) besitzen.⁴⁹ Dieser Vorteil kann allerdings nur durch zusätzliche Maßnahmen wie Isolation erreicht werden. Dazu kommen eine entsprechende Vergasung und Verdichtung bei gasförmiger Übergabe an verbrauchende Fahrzeuge. Dies ist an der Übergabestelle, ausgeführt als Tankstelle oder mobiler Dispenser, einzurichten.

3.4 Systemkonzepte für die Versorgung

3.4.1 Standortwahl

Die Prüfung der notwendigen Tankstellenstandorte muss maßgeblich auf Basis betrieblicher Kriterien durchgeführt werden, da die Reichweite der Fahrzeuge meist nur für einen Tagesumlauf ausreicht. Für eine Standortwahl sollten folgende Kriterien berücksichtigt werden:

- Es kommen nur Standorte in Frage, an denen Linien planmäßig enden bzw. beginnen, sodass keine Linienläufe gebrochen werden müssen oder, wenn möglich, nächtliche Überführungen entlang der Linien nicht erforderlich werden.

⁴⁹ https://www.energieagentur.nrw/brennstoffzelle/brennstoffzelle-wasserstoff-elektromobilitaet/wasserstoffspeicher_distribution_tankstellen, abgerufen am 10.09.2020.

- Es sollen möglichst viele Tageseinsätze der Fahrzeuge am Standort beginnen bzw. enden, sodass die Fahrzeuge in der Nachtpause lokal betankt werden können.
- Die Standorte der Tankstellen sollen in der Nähe zur Herstellungsanlage liegen um die Überführungskosten und -risiken des Wasserstoffs zu minimieren.
- Die Umgestaltung der heutigen Umlaufpläne ist ggf. notwendig und zulässig, daraus kann ein Fahrzeugmehrbedarf resultieren. Dieser wird nicht mitbetrachtet.
- Gibt es die Möglichkeit, aus eigenen Erzeugeranlagen für erneuerbare Energien (Windräder, Solarparks etc.) des Wasserstoff-Herstellers die Energie zu nutzen, sollte dies geprüft werden. Es können so Netznutzungsgebühren des elektrischen Netzes sowie verschiedene Gebühren und Abgaben in wirtschaftlich relevantem Maß reduziert bzw. zu Null gesetzt werden.
- Mögliche Szenarien des geplanten Baustellenverkehrs bzw. technisch oder- witterungsbedingter kurzfristiger Unterbrechungen (bspw. nach einem Unterwetter) eines Netzes sollten nicht zum Totalausfall des Netzes führen. Es sind deshalb, wenn betrieblich sinnvoll und möglich, mehrere Tankstellenstandorte in einem Netz anzuordnen, um so den Betrieb in Teilnetzen zu ermöglichen.

3.4.2 Systemauswahl

Die Wasserstoffversorgung von Standorten zur Betankung kann auf viele Arten realisiert werden. Dabei kann primär zwischen Erzeugung vor Ort und Versorgung durch Belieferung differenziert werden. Bei der weiteren Betrachtung kann bei fremdbelieferten Anlagen nach der Unterbringung des Dispensers unterschieden werden. Auf die Möglichkeiten der Erzeugung wurde bereits in Kapitel 3.2 eingegangen. Hierbei bietet die zentralisierte Erzeugung grundsätzlich den Vorteil des hohen Wirkungsgrads und der zeitlich höheren Auslastung durch Überlagerung von Nachfragekurven. Dem stehen ggf. entsprechende Transportkosten und -emissionen gegenüber. Hierbei werden standardmäßig Trailer verwendet. Diese können, wie in Abbildung 9 dargestellt, einen integrierten Dispenser besitzen. Ein auf LKW-Trailern und leicht transportierbaren Containern bietet bspw. die DB Energie im Projekt H2goesRail an⁵⁰, aber auch weitere Hersteller und Gaslieferanten bieten entsprechende Systeme an.

⁵⁰ <https://nachhaltigkeit.deutschebahn.com/de/massnahmen/wasserstoff/h2goesrail>, zuletzt abgerufen am 11.10.2023.

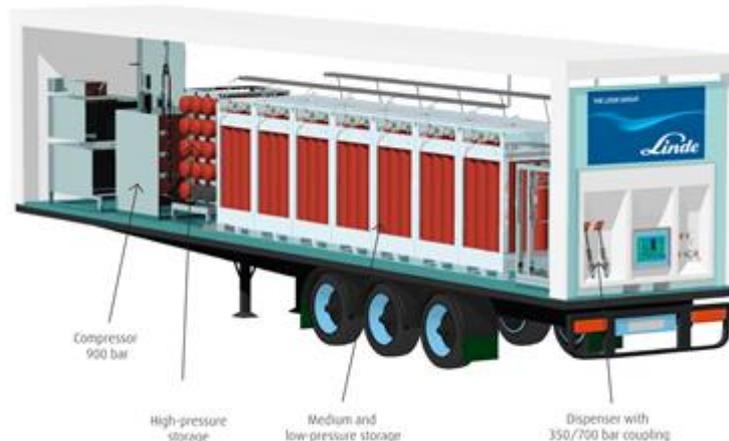


Abbildung 9: Wasserstofftrailer mit integrierter Verdichtung und Dispensern. Quelle: Linde AG, 2016

Alternativ dazu besteht die Möglichkeit, einen stationären Dispenser zu errichten und den Gasspeicher in Form eines austauschbaren Trailers zu betreiben. Der Vorteil besteht hierbei in dem geringeren Aufwand und dem höheren Speichervermögen des Trailers.

Im Netz Bayerwald wird eine gleisnahe Betankung an zwei Standorten (Zwiesel und voraussichtlich Plattling) unterstellt, an mindestens einem der Standorte mit eigener Wasserstofferzeugung (in Zwiesel). Detailliertere Ausführungen finden sich hierzu im Kapitel 5.6.

4 Betrieblich-technische Randbedingungen

4.1 Untersuchungsraum

Der Untersuchungsraum wurde in der Vorgängerstudie dieses Ergänzungsberichts erläutert (siehe *2022-12-19 BEG Bayerwald Bericht_2022-618350-659.0_fin Kap. 4.1*).

4.2 Fahrzeuge

Die für die Untersuchung angenommenen Fahrzeugparameter der FCMU-Referenzfahrzeuge basieren auf von zwei Herstellern zur Verfügung gestellten Daten. Jene des BEMU-Fahrzeuges sind unverändert zum Ausgangsbericht (*2022-12-19 BEG Bayerwald Bericht_2022-618350-659.0_fin Kap 4.4*). Für die Untersuchung wurde mit Blick auf die Auslegung der erforderlichen elektrischen sowie Betankungsinfrastruktur eine maximale Besetzung aller Sitzplätze der Fahrzeuge angenommen.

Die herstellerseitig übermittelten Fahrzeugdaten werden dem vorliegenden Bericht (unveröffentlicht) beigegeben. Zur Bestimmung der zu überwindenden Fahrwiderstandskräfte in der Ebene wird die Davis-Formel

$$F_W = A + B \cdot v + C \cdot v^2$$

mit den aufgeführten Parametern verwendet. Neigungs- und Bogenwiderstand werden, wie im Ausgangsbericht, ortsabhängig auf Basis der vom Auftraggeber erhaltenen Streckendaten hinzugefügt.

In der Hilfsbetriebeleistung ist der Leistungsbedarf für die Klimatisierung, Beleuchtung, Batterie- und Brennstoffzellentemperierung (Heizungs- bzw. Kühlungsanlagen der Speicher und Brennstoffzellen) und Lüftung berücksichtigt. Hierbei wurde ein durchgehender Betrieb mit einem konstanten Wert unterstellt. Real schwankt die Hilfsbetriebeleistung je nach momentanem Leistungsbedarf der einzelnen Verbraucher (je nach Einschaltzustand), im Mittel ergibt sich jedoch der angesetzte Durchschnitts-Leistungsbedarf.

Für die Modellierung des Antriebs wird ein Gesamtwirkungsgrad von 85 % unterstellt, der die Verluste zwischen der mechanischen Leistung am Rad und dem elektrischen Leistungsbezug am Transformatorausgang bzw. am Brennstoffzellenausgang beschreibt.

Der zulässige Ladezustandsbereich der Fahrzeugdynamikbatterien wurde unter Berücksichtigung einer Batteriealterungsreserve, die während der Nutzung der Batterie durch eine alterungsbedingte Reduzierung der maximalen Energiespeichermenge über der Lebensdauer abgebaut wird, und einer schonenden Batterienutzung auf den Bereich zwischen 90 % und 30 % des Ladezustands (State-of-Charge, SOC) festgelegt.

Die herstellerseitig übermittelten Zugkraft-Geschwindigkeits-Diagramme der FCMU-Fahrzeuge werden dem vorliegenden Bericht (unveröffentlicht) beigegeben.

Mit den zugrunde gelegten Fahrzeugen kann sowohl die Einsatzfähigkeit von langen (bspw. Alstom iLint) als auch von kurzen (bspw. Siemens Mireo Plus H) FCMU-Fahrzeugen im Bayerwaldnetz überprüft werden.

4.3 Betriebliche Netzinfrastruktur

Eine detaillierte Beschreibung der Infrastruktur wurde bereits im Ausgangsbericht durchgeführt (siehe *2022-12-19 BEG Bayerwald Bericht_2022-618350-659.0_fin Kap 4.5*).

5 Betrieblich-technische Machbarkeit

5.1 Methodik BEMU

Eine ausführliche Beschreibung der simulativen Berechnungsmethodik der BEMU-Fahrzeuge wurde bereits im Ausgangsbericht durchgeführt (2022-12-19 *BEG Bayerwald Bericht_2022-618350-659.0_fin* Kap 5.1 und 5.2).

5.2 Untersuchung des Einflusses der Elektrifizierung Klatovy – Bayerisch Eisenstein

Im Rahmen der Ergänzungsuntersuchung wird der Einfluss einer möglichen Elektrifizierung auf dem vollständig in Tschechien liegenden Streckenabschnitt Klatovy (CZ) – Bayerisch Eisenstein (inkl. des deutschen Teils des Bahnhofs Bayerisch Eisenstein/ Železná Ruda-Alžbětín) untersucht. In nachfolgender Tabelle 1 ist zunächst der in Bayerisch Eisenstein endende Verkehr dargestellt. Dabei ist unterstellt, dass in Bayerisch Eisenstein mit 25 kV 50 Hz, gespeist von tschechischer Seite, nachgeladen werden kann. Eine Nachladung mit beiden Spannungssystemen (D: 15 kV 16,7 Hz und CZ: 25 kV 50 Hz) kann bei den geplanten Neufahrzeugen ohne großen Mehraufwand realisiert werden. Dies muss allerdings bei der Ausschreibung im Lastenheft inkl. der notwendigen Zulassungen (auch bei einem Betrieb ausschließlich auf dem deutschen Abschnitt nur mit Ladung in Bayerisch Eisenstein) vorgegeben werden. Technisch bedeutet die Ausrüstung für beide Spannungssysteme vor allem eine Isolationsauslegung für die Spannungsgrenzen des 25-kV-Systems und eine Ausrüstung der Fahrzeuge mit einem anderen Trafo, der über zwei sogenannte Anzapfungen für beide Spannungssysteme verfügt sowie Software- und Zulassungsanpassungen, wobei ein Teil der in der Ausgangsstudie vorgestellten Fahrzeuge (z. B. Siemens Mireo Plus B) üblicherweise die grundlegenden Anforderungen hierfür bereits erfüllen bzw. die Fahrzeugplattform dafür ausgelegt wurde, mit beiden Spannungssystemen umgehen zu können.

Die in der Ausgangsuntersuchung ermittelte notwendige OLIA Nyrsko von Petrovice nad Uhlavou nach Dešenice ist Teil der Strecke, die zur Voll-elektrifizierung vorgesehen ist, und kann somit als Einzelmaßnahme entfallen.

Es soll untersucht werden, inwieweit die im Ausgangsprojekt (2022-12-19 *BEG Bayerwald Bericht_2022-618350-659.0_fin*) ermittelte erforderliche elektrische Infrastruktur zur Durchführung eines BEMU-Betriebes reduziert werden kann. Die Prüfungen beziehen sich insbesondere auf folgende angenommene Infrastrukturmaßnahmen:

- Oberleitungsverlängerung Plattling – Deggendorf Brücke/Hbf,
- Anteil Zwiesel – Ludwigsthal der Oberleitungsinselanlage (OLIA) Zwiesel und
- Anteil Zwiesel – Bettmannsäge der OLIA Zwiesel.

Tabelle 1: Energiebedarf und SOC-Bilanz der RB 35 bis Bayerisch Eisenstein mit verkürzter OLIA Zwiesel

RB 35 bis Bayerisch Eisenstein, Ladeinsel Bettmannsäge - Zwiesel	Fahrzeit/ Streckenlänge	spez. Energiebedarf/km bzw. Lade-/ Entlade-Leistung	Δ Energie im Speicher	Speicher- Energieinhalt 495 kWh	resultierender State-Of-Charge	nominaler Speicher- energieinhalt 550 kWh entspricht 100 % SOC
Fahrstrecke Plattling - Bettmannsäge	53,334 km	-5,86 kWh/km	-313 kWh	182 kWh	33%	
Ladezeit Insel Bettmannsäge - Zwiesel	4 min	1200 kW	71 kWh	254 kWh	46%	
Standzeit in Zwiesel	2 min	1200 kW	36 kWh	290 kWh	53%	
Ladezeit Insel Zwiesel – Ludwigsthal	0 min	1200 kW	0 kWh	290 kWh	53%	
Fahrstrecke Zwiesel - Bayerisch Eisenstein	13,78 km	-7,12 kWh/km	-98 kWh	191 kWh	35%	
Standzeit in Bayerisch Eisenstein	31 min	500 kW	231 kWh	422 kWh	77%	
Fahrstrecke Bayerisch Eisenstein - Zwiesel	13,78 km	-0,92 kWh/km	-13 kWh	409 kWh	74%	
Ladezeit Insel Ludwigsthal – Zwiesel	0 min	1200 kW	0 kWh	409 kWh	74%	
Standzeit in Zwiesel	2 min	1200 kW	36 kWh	445 kWh	81%	
Ladezeit Insel Zwiesel - Bettmannsäge	4 min	1200 kW	71 kWh	495 kWh	90%	
Fahrstrecke Bettmannsäge - Plattling	53,334 km	-2,89 kWh/km	-154 kWh	341 kWh	62%	
Standzeit in Plattling	11 min	1200 kW	196 kWh	495 kWh	90%	
Fahrstrecke Plattling - Bettmannsäge	53,334 km	-5,86 kWh/km	-313 kWh	182 kWh	33%	
Ladezeit Insel Bettmannsäge - Zwiesel	4 min	1200 kW	71 kWh	254 kWh	46%	
Standzeit in Zwiesel	2 min	1200 kW	36 kWh	290 kWh	53%	
Ladezeit Insel Zwiesel – Ludwigsthal	0 min	1200 kW	0 kWh	290 kWh	53%	
Fahrstrecke Zwiesel - Bayerisch Eisenstein	13,78 km	-7,12 kWh/km	-98 kWh	191 kWh	35%	
Standzeit in Bayerisch Eisenstein	31 min	500 kW	231 kWh	422 kWh	77%	
Fahrstrecke Bayerisch Eisenstein - Zwiesel	13,78 km	-0,92 kWh/km	-13 kWh	409 kWh	74%	
Ladezeit Insel Ludwigsthal – Zwiesel	0 min	1200 kW	0 kWh	409 kWh	74%	
Standzeit in Zwiesel	2 min	1200 kW	36 kWh	445 kWh	81%	
Ladezeit Insel Zwiesel - Bettmannsäge	4 min	1200 kW	71 kWh	495 kWh	90%	
Fahrstrecke Bettmannsäge - Plattling	53,334 km	-2,89 kWh/km	-154 kWh	341 kWh	62%	
Standzeit in Plattling	11 min	1200 kW	196 kWh	495 kWh	90%	

Aus Tabelle 1 ergibt sich, dass bei einem gebrochenen Verkehr, bei dem alle Züge in Bayerisch Eisenstein enden, der Wegfall der Oberleitungsverlängerung Plattling – Deggendorf möglich ist. Dies entspricht auch den Erkenntnissen aus dem Ausgangsprojekt, wonach bei kurzen BEMU keine Oberleitungsverlängerung ab Plattling notwendig wird. Die Fahrzeuge können den kompletten Streckenabschnitt von Plattling bis zum Beginn der OLIA Zwiesel in Bettmannsäge im Batteriebetrieb befahren (siehe blaue Markierung in Tabelle 1). Auf der kompletten Strecke von Plattling bis zur OLIA in Bettmannsäge (im Batteriebetrieb) sinkt der Ladezustand der Batterie (State-of-Charge – SOC) auf 33 %. Der unter Berücksichtigung von Alterungsreserven und alterungsärmerer Nutzung der Speicher festgelegte minimale SOC von 30 % wird nicht unterschritten, trotz angesetztem Worst-Case-Szenario hinsichtlich des Energiebedarfes.

Des Weiteren ist der Entfall des Anteils von Zwiesel bis Ludwigsthal der OLIA Zwiesel möglich. Dies führt dazu, dass das Fahrzeug mit einem SOC von 35 % (siehe gelbe Markierung in Tabelle 1) in Bayerisch Eisenstein ankommt. Die notwendigen Energiereserven aus der Ausgangsuntersuchung, die zur Überwindung des Abschnittes von Bayerisch Eisenstein bis zum Scheitelpunkt der Strecke bei Špičák vorgesehen waren, können aufgrund der unterstellten Vollelektrifizierung ab Bayerisch Eisenstein entfallen. Durch die Nachlademöglichkeit in Bayerisch Eisenstein ist außerdem die Rückkehr in die OLIA Zwiesel in Zwiesel möglich. Ein zusätzlicher Entfall des OLIA-Anteils von Bettmannsäge bis Zwiesel würde zu einer Unterschreitung des minimalen SOC-Wertes von 30 % schon im Abschnitt Plattling – Zwiesel führen, außerdem wäre auch die nur knappe Aufenthaltszeit von zwei bis vier Minuten in Zwiesel mit einer möglichen Standladung nicht ausreichend für eine Wiederaufladung der Speicher zur Weiterfahrt nach Bayerisch Eisenstein, geschweige denn für die anschließende Rückfahrt nach Plattling.

In Bayerisch Eisenstein ist eine Ladeleistung von lediglich ca. 500 kW (technisch sind im Stand 1200 kW umsetzbar) ausreichend um den Batteriespeicher

innerhalb der 31 Minuten Standzeit auf 77 % nachzuladen. Dies genügt, um über die OLIA Zwiesel auf deren verbleibendem Abschnitt von Zwiesel bis Bettmannsäge zunächst wieder einen SOC von 90 % zu erreichen und in Plattling mit noch immer 62 % (siehe grüne Markierung in Tabelle 1) SOC den Ladevorgang starten zu können. Dort kann unter der Bestands-Oberleitung in der regulären Wendezeit wieder auf den initialen SOC-Wert von 90 % vollständig nachgeladen werden. Auch bereits acht bis neun Minuten Ladezeit wären ausreichend, sodass auch leichte Verspätungen ausgeglichen werden können. Bei durchschnittlichen Bedingungen sind zudem die Verbrauchswerte geringer als bei der vorliegenden Maximalwertbetrachtung zur Beurteilung der technischen Machbarkeit. Die Nachladung mit lediglich 500 kW in Bayerisch Eisenstein verdeutlicht, dass selbst eine geringere Ladeleistung in Bayerisch Eisenstein ausreichend ist, um einen stabilen Verkehr ohne Durchbindung nach Tschechien zu gewährleisten, sofern in Bayerisch Eisenstein die Ladung aus dem tschechischen Oberleitungsnetz möglich ist.

Zusammenfassend ergaben die oben beschriebenen Prüfungen folgende Reduktionsoptionen bei den notwendigen Infrastrukturmaßnahmen für den BEMU-Betrieb im Bayerwaldnetz:

- Entfall der Oberleitungsverlängerung von Plattling nach Deggendorf Brücke/Hbf
→ **möglich (ca. 8 Strecken-km)**
- Wegfall des Anteils von Zwiesel nach Ludwigsthal der OLIA Zwiesel
→ **möglich (ca. 5 Strecken-km)**

dafür notwendig:

Nachladung wendender Züge in Bayerisch Eisenstein (Elektrifizierung auch des deutschen Teils des Bahnhofs Bayerisch Eisenstein mit den in Tschechien üblichen 25 kV 50 Hz – bedingt mit technisch geringem Aufwand herstellbare Tauglichkeit der BEMU hierfür, was in den Fahrzeug-Ausschreibungsunterlagen vorgegeben werden muss!)

- Entfall des Anteils von Bettmannsäge nach Zwiesel der OLIA Zwiesel
→ **nicht möglich**

Zudem ist auch der durchgebundene Verkehr bis Klatovy zu untersuchen. Die Untersuchungsergebnisse sind in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Energiebedarf und SOC-Bilanz RB 35 bis Klatovy mit reduzierter Oberleitungsinfrastruktur

RB 35 bis Klatovy, Ladeinsel Bettmannsäge - Zwiesel	Fahrzeit/ Streckenlänge	spez. Energiebedarf/km bzw. Lade-/ Entlade-Leistung	Δ Energie im Speicher	Speicher- Energieinhalt 495 kWh	resultierender State-Of-Charge 90%	nominaler Speicher- energieinhalt 550 kWh entspricht 100 % SOC
Fahrstrecke Plattling - Bettmannsäge	53,334 km	-5,86 kWh/km	-313 kWh	182 kWh	33%	
Ladezeit Insel Bettmannsäge - Zwiesel	4 min	1200 kW	71 kWh	254 kWh	46%	
Standzeit in Zwiesel	2 min	1200 kW	36 kWh	290 kWh	53%	
Ladezeit Insel Zwiesel – Ludwigsthal	0 min	1200 kW	0 kWh	290 kWh	53%	
Fahrstrecke Zwiesel - Bayerisch Eisenstein	13,78 km	-7,12 kWh/km	-98 kWh	191 kWh	35%	
Standzeit in Bayerisch Eisenstein	2 min	1200 kW	41 kWh	233 kWh	42%	
Fahrzeit Bayerisch Eisenstein - Klatovy	57 min	1200 kW	1017 kWh	495 kWh	90%	
Standzeit in Klatovy	24 min	1400 kW	500 kWh	495 kWh	90%	
Fahrzeit Klatovy - Bayerisch Eisenstein	57 min	1200 kW	1017 kWh	495 kWh	90%	
Standzeit in Bayerisch Eisenstein	2 min	1200 kW	41 kWh	495 kWh	90%	
Fahrstrecke Bayerisch Eisenstein - Zwiesel	13,78 km	-0,92 kWh/km	-13 kWh	482 kWh	88%	
Ladezeit Insel Ludwigsthal – Zwiesel	0 min	1200 kW	0 kWh	482 kWh	88%	
Standzeit in Zwiesel	2 min	1200 kW	36 kWh	495 kWh	90%	
Ladezeit Insel Zwiesel - Bettmannsäge	4 min	1200 kW	71 kWh	495 kWh	90%	
Fahrstrecke Bettmannsäge - Plattling	53,334 km	-2,89 kWh/km	-154 kWh	341 kWh	62%	
Standzeit in Plattling	11 min	1200 kW	196 kWh	495 kWh	90%	
Fahrstrecke Plattling - Bettmannsäge	53,334 km	-5,86 kWh/km	-313 kWh	182 kWh	33%	
Ladezeit Insel Bettmannsäge - Zwiesel	4 min	1200 kW	71 kWh	254 kWh	46%	
Standzeit in Zwiesel	2 min	1200 kW	36 kWh	290 kWh	53%	
Ladezeit Insel Zwiesel – Ludwigsthal	0 min	1200 kW	0 kWh	290 kWh	53%	
Fahrstrecke Zwiesel - Bayerisch Eisenstein	13,78 km	-7,12 kWh/km	-98 kWh	191 kWh	35%	
Standzeit in Bayerisch Eisenstein	2 min	1200 kW	41 kWh	233 kWh	42%	
Fahrzeit Bayerisch Eisenstein - Klatovy	57 min	1200 kW	1017 kWh	495 kWh	90%	
Standzeit in Klatovy	24 min	1400 kW	500 kWh	495 kWh	90%	
Fahrzeit Klatovy - Bayerisch Eisenstein	57 min	1200 kW	1017 kWh	495 kWh	90%	
Standzeit in Bayerisch Eisenstein	2 min	1200 kW	41 kWh	495 kWh	90%	
Fahrstrecke Bayerisch Eisenstein - Zwiesel	13,78 km	-0,92 kWh/km	-13 kWh	482 kWh	88%	
Ladezeit Insel Ludwigsthal – Zwiesel	0 min	1200 kW	0 kWh	482 kWh	88%	
Standzeit in Zwiesel	2 min	1200 kW	36 kWh	495 kWh	90%	
Ladezeit Insel Zwiesel - Bettmannsäge	4 min	1200 kW	71 kWh	495 kWh	90%	
Fahrstrecke Bettmannsäge - Plattling	53,334 km	-2,89 kWh/km	-154 kWh	341 kWh	62%	
Standzeit in Plattling	11 min	1200 kW	196 kWh	495 kWh	90%	

Wie Tabelle 2 zeigt, sinkt auch, wie bei den Zugläufen ohne Durchbindung nach Tschechien, beim durchgebundenen Verkehr bis Klatovy der SOC im Abschnitt von Plattling nach Bettmannsäge nicht unter 33 % (siehe blaue Markierung in Tabelle 2) bzw. ab Zwiesel bis Bayerisch Eisenstein nicht unter 35 % (siehe gelbe Markierung in Tabelle 2). Der minimale Ladezustand unterschreitet somit den festgelegten minimalen SOC von 30 % nicht. Dementsprechend können die oben beschriebenen Ergebnisse der Prüfungen zum möglichen Entfall der Oberleitungsinfrastruktur bestätigt werden.

Die Nachladezeit in Bayerisch Eisenstein muss nicht mehr betrachtet werden, da bei bis Klatovy durchgebundenen Verkehren die Fahrt ab Bayerisch Eisenstein im Oberleitungsbetrieb in beide Richtungen erfolgt (siehe grüne Markierung in Tabelle 2). Die Fahrt nach Klatovy und zurück ermöglicht ohne Einschränkungen eine speicherschonende leistungsarme Nachladung der Fahrzeugenergiespeicher. Die BEMU brauchen hierzu eine vollständige Zulassung zum Verkehr als Oberleitungsfahrzeuge im Netz der Tschechischen Eisenbahnen.

5.3 Gesamtübersicht des erforderlichen Infrastrukturbedarfs BEMU bei vollständiger Elektrifizierung des tschechischen Netzanteils

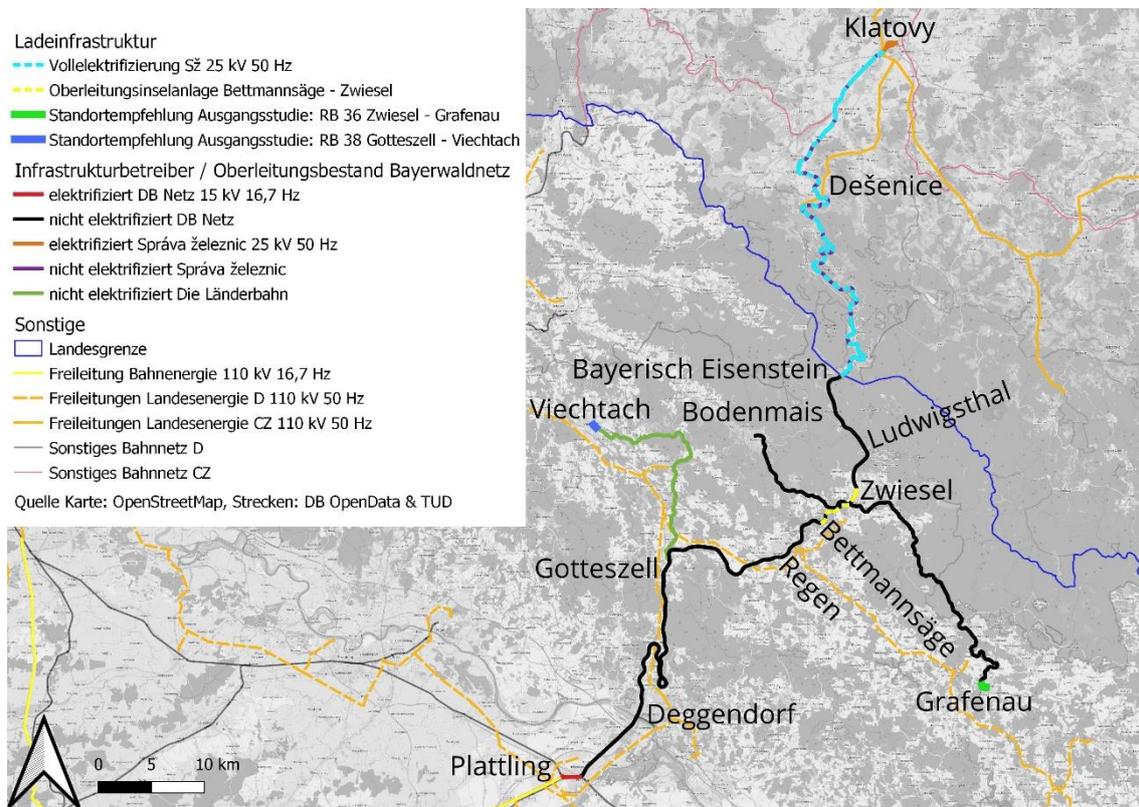


Abbildung 10: Übersicht des resultierenden Infrastrukturbedarfs für das Bayerwaldnetz bei Vollelektrifizierung von Klatovy bis Bayerisch Eisenstein

Unter der Prämisse, dass der Streckenabschnitt in Tschechien von Klatovy bis Železná Ruda-Alžbětín/ Bayerisch Eisenstein vollständig elektrifiziert ist, sind für einen robusten, pünktlichen und störungsfreien Fahrgastbetrieb mit Oberleitungs-/Batteriehybrid-Fahrzeugen im Bayerwaldnetz im Ergebnis der betrieblich-technischen Untersuchungen folgende Infrastrukturmaßnahmen erforderlich. Voraussetzung ist zudem, dass auch der gesamte deutsche Teil des Bahnhofs Železná Ruda-Alžbětín/ Bayerisch Eisenstein Teil der tschechischen Elektrifizierung ist. Die Maßnahmen sind, in Abbildung 10 dargestellt, wobei nur die empfohlenen Infrastrukturvarianten für die RB 36 und RB 38 aus der Ausgangsstudie dargestellt sind:

- **Verkürzte** Oberleitungsinselanlage Zwiesel von Bettmannsäge nach Zwiesel
- **Weiterhin** eine Ladestation in Grafenau
- **Weiterhin** eine Ladestation in Viechtach
- sowie jeweils ergänzend **weiterhin** die notwendigen Anbindungsmaßnahmen an das lokale Energieversorgungsnetz

5.4 Methodik FCMU

Zur Ermittlung der Fahrzeit und zur Überprüfung der Einhaltung der Referenzfahrzeiten wird in der vorliegenden Untersuchung der Bahnbetriebssimulator OpenTrack (vorgestellt im Ausgangsbericht im Kapitel 5.1 Bericht *2022-12-19 BEG Bayerwald Bericht_2022-618350-659.0_fin*) eingesetzt. Es werden für alle Simulationen sogenannte Spitzfahrten (minimale Fahrzeit bei maximalen Leistungsanforderungen der Hilfs- und Komfortbetriebeleistungen sowie Besetzung) unterstellt. Eine Spitzfahrt ist gekennzeichnet durch maximale Beschleunigung bis zur (zulässigen) Höchstgeschwindigkeit, einer maximalen Zeitdauer der Beharrungsfahrt bei zulässiger Höchstgeschwindigkeit und anschließender maximaler Bremsverzögerung.

Die Bewertung der technisch-betrieblichen Machbarkeit erfolgt auf Basis der zeit- und wegabhängigen Energiebedarfswerte und der daraus resultierenden Ladezustände der Dynamikbatterien unter Berücksichtigung der zugrunde gelegten Topografie detailliert je Linie.

Die aus dem Simulationsprogramm OpenTrack resultierenden mechanischen Energiebedarfe je Zeitschritt werden im Postprozess, mithilfe von Excel, über Wirkungsgrade des Antriebsstranges und der Dynamikbatterie in elektrische Energiebedarfe für jeden Zeitschritt umgewandelt. Anhand der elektrischen Energiebedarfe je Zeitschritt wird der Ladezustands-Verlauf (SOC-Verlauf) der Dynamikbatterie errechnet. Über die kumulierten Energiebedarfe je Zeitschritt wird der spezifische Wasserstoffbedarf für jede Linie errechnet. Anhand der Fahrzeugkilometer auf jeder Linie lässt sich daraus auch der durchschnittliche Energiebedarf für alle Linien bei Spitzfahrt und durchschnittlicher Fahrt ableiten.

Die Bewertung des SOC-Verlaufs der Dynamikbatterie ist wichtig, da in allen Wasserstoff-/Batterie-Hybridfahrzeugen am Markt die Brennstoffzellenleistung weit unterhalb der zeitlich begrenzt notwendigen Traktions- und Hilfsbetriebeleistung liegt (siehe auch Kapitel 2.3.3). Ist jedoch die Zeitspanne hohen Leistungsbedarfs aufgrund topografisch sehr anspruchsvollen Terrains sehr groß (durch großen zu überwindenden Höhenunterschied), kann es zu einer Unterschreitung des zulässigen SOC der Dynamikbatterie kommen, da ein zu großer Teil der notwendigen Traktions- und Hilfsbetriebeleistung von der Batterie gedeckt werden muss, bevor eine ausreichende Nachladung mit Hilfe der Brennstoffzelle erfolgen kann.

5.5 Betriebsnachweis FCMU

5.5.1 Analyse der Betriebskonzepte

Mit der Simulationssoftware OpenTrack (OT) wurde überprüft, ob die vom Auftraggeber mit einem herkömmlichen RegioShuttle RS1 ermittelten Fahrzeiten auch mit den FCMU-Referenzfahrzeugen erreicht werden können. Im Minutenbereich ergaben sich keine wesentlichen Unterschiede zwischen den vom Auftraggeber angegebenen Sollfahrzeiten und den im OT ermittelten Fahrzeiten (siehe Tabelle 3).

Tabelle 3: Vergleich der Sollfahrzeiten und der in OpenTrack (OT) errechneten Fahrzeiten

Linie	Sollfahrzeit	Fahrzeit in OT langer FCMU	Fahrzeit in OT kurzer FCMU
RB 35 Bayerisch Eisenstein – Plattling	1 h 11 min	1 h 11 min	1 h 11 min
RB 35 Plattling – Bayerisch Eisenstein	1 h 07 min	1 h 07 min	1 h 07 min
RB 35 Bayerisch Eisenstein – Klatovy	59 min	59 min	59 min
RB 35 Klatovy – Bayerisch Eisenstein	59 min	60 min	60 min
RB 36 Zwiesel – Grafenau	47 min	47 min	47 min
RB 36 Grafenau – Zwiesel	47 min	47 min	47 min
RB 37 Zwiesel – Bodenmais	21 min	21 min	21 min
RB 37 Bodenmais – Zwiesel	20 min	20 min	20 min
RB 38 Gotteszell – Viechtach	43 min	43 min	43 min
RB 38 Viechtach - Gotteszell	41 min	41 min	41 min

Nach Überprüfung der vorgegebenen Sollfahrzeiten wurde der SOC-Verlauf der Dynamikbatterien für jede Linie berechnet und analysiert. Hierbei wurden konservative Annahmen getroffen. Dies bezieht sich zum einen darauf, dass die Umläufe jeder Linie an der ersten Haltestelle nicht mit vollgeladenem Batteriespeicher beginnen. Als Start-SOC wurden hier 160 kWh (73 %) gewählt (vergleiche Abbildung 11). Als zweite konservative Annahme wurde die Brennstoffzellenleistung auf unterschiedlichen Streckenabschnitten bzw. Linienabschnitten gedrosselt (20 % - 80 %), wodurch die Dynamikbatterie auf topografisch weniger anspruchsvollen Streckenabschnitten mit geringerer Leistung nachgeladen wird. Beide konservativen Annahmen sollen zeigen, dass der Energieinhalt der Dynamikbatterien und die Brennstoffzellenleistung bei beiden untersuchten Fahrzeugtypen ausreichend dimensioniert ist, um einen stabilen und robusten Betrieb zu gewährleisten.

In Abbildung 11 ist der SOC-Verlauf der Dynamikbatterie des kurzen FCMU-Referenzfahrzeuges dargestellt. Der Batterieenergieinhalt beträgt 220 kWh (90 % - 30 % SOC nutzbar). Der minimale SOC auf dem Streckenabschnitt von Klatovy (CZ) bis Bayerisch Eisenstein beträgt 81 kWh, was einem minimalen Speicherladezustand von 36 % entspricht. Des Weiteren ist zur Veranschaulichung das Höhenprofil auf diesem Streckenabschnitt dargestellt. Hierbei ist zu sehen, dass insbesondere im topografisch anspruchsvollsten Streckenabschnitt (von Nyrsko bis kurz vor Špičák) der SOC stark abfällt. Trotz des sehr anspruchsvollen Höhenprofils wird der minimale SOC nicht unterschritten. Dies gilt auch für alle anderen Streckenabschnitte der RB 35 sowie auf den Linien der RB 36 bis RB 38, da diese immer geringere Anforderungen an das Energie-

management stellen. Alle weiteren SOC-Diagramme sind aufgrund der Übersichtlichkeit dem Anhang beigefügt. Siehe hierzu die SOC-Verläufe aller Strecken- bzw. Linien im Bayerwaldnetz in Anlage 1 bis Anlage 24.



Abbildung 11: SOC-Verlauf der Dynamikbatterie, kurzer FCMU, Klatovy – Bayerisch Eisenstein

5.5.2 Berechnung des spezifischen Wasserstoffbedarfs

Aus den mechanischen Leistungsbedarfen der OpenTrack-Simulation wurden im Postprozess zunächst die Energiebedarfe je Zeitschritt für die Bewertung des SOC-Verlaufs ermittelt. Anschließend wurden aus den kumulierten Energiebedarfen je Zeitschritt die spezifischen Wasserstoffbedarfe je Streckenabschnitt der RB 35 bzw. der Linien RB 36 bis RB 38 berechnet. Dabei ergeben sich Wasserstoffbedarfe im Bereich von 0,06 und 0,49 kg H₂/km (siehe Abbildung 12). Jener H₂-Bedarf des langen FCMU liegt geringfügig über jenem des kurzen FCMU. Ein Grund hierfür sind die unterschiedlichen Leermassen. Der durchschnittliche Wasserstoffbedarf im gesamten Netz, inklusive der Durchbindung bis Klatovy, liegt bei ca.:

- kurzer FCMU: 0,251 kg/km
- langer FCMU: 0,272 kg/km

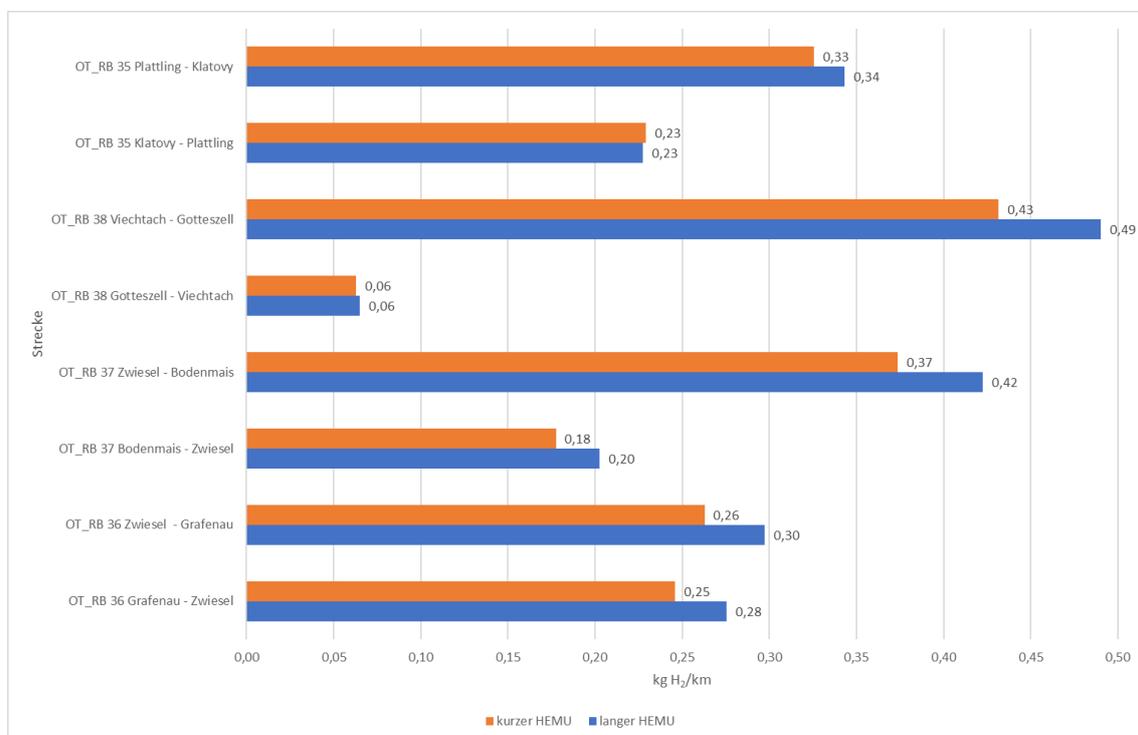


Abbildung 12: Spezifischer H₂-Bedarf kurzer und langer FCMU

5.6 Gesamtübersicht des erforderlichen Infrastrukturbedarfs FCMU

Zur Versorgung des Bayerwaldnetzes waren in Abstimmung mit dem Auftraggeber geeignete Standorte für eine Betankung festzulegen.

Hierzu wurde zunächst anhand der neu errichteten Tankstelle in Bremervörde zur Betriebsaufnahme des Netzes Weser-Ems der Eisenbahnen und Verkehrsbetriebe Elbe-Weser (EVW) bzw. der Landesnahverkehrsgesellschaft

Niedersachsen mbH (LNVG eine Flächenbedarfsabschätzung durchgeführt. Die durch Linde errichtete und Betriebene Tankstelle ist in Abbildung 13 dargestellt.



Abbildung 13: Ansicht Tankstelle der EVB/ Linde in Bremervörde⁵¹

Im Folgenden sind die Charakteristika der Tankstelle Bremervörde aufgeführt.

- Die Grundfläche beträgt laut Planfeststellung 0,8 ha (ca. 90x90 m) und
- die Tankstelle kann damit die 14 Fahrzeuge des LNVG-Netzes versorgen.
- Bisher (2023, 1. Betriebsjahr) nur mit Lieferwasserstoff aus dem Chemiepark Stade betrieben, ab dem dritten Betriebsjahr ist eine Steigerung auf 35 % Elektrolyseanteil am Wasserstoff, maßgeblich mit elektrischer Energie aus Windkraft, angestrebt. Langfristig soll dieser Anteil auf bis zu 95 % steigen.

Wichtigste Erkenntnis ist, dass die Tankstelle in Bremervörde in ihrer Kapazität und ihrem Flächenbedarf hohe Ähnlichkeiten zum Bayerwaldnetz erwarten lässt. Die angegebene Fläche von ca. 0,8 ha wird bei einer ähnlichen Kapazität ist für die Betankung der Fahrzeuge im Bayerwaldnetz ebenfalls anzunehmen und dient als Grundlage für die Flächenverfügbarkeit an den Standorten.

Da die Tankstelle in Bremervörde sowohl Liefer-Wasserstoff als auch perspektivisch vor Ort erzeugten Elektrolyse-Wasserstoff verarbeiten kann, bietet sie ausreichend Resilienz und Flexibilität für die Annahme als Referenz-Bauwerk im Bayerwaldnetz.

Prüfung der möglichen Standorte

Im Ergebnis der Prüfungen der Kriterien, dargestellt im Abschnitt 3.4.1, lässt sich mit Zwiesel zunächst betrieblich ein wesentlicher Standort ermitteln, da dort für

⁵¹ <https://www.lnvg.de/wasserstoff>, zuletzt abgerufen am 16.10.2023

die Linien RB 35, RB 36 und RB 37 der Beginn bzw. das Ende von Tagesumläufen liegt und somit eine einfache Zuführung zur Tankstelle in den Abend- und Nachtstunden möglich wird. Außerdem befindet sich das auch zukünftig voraussichtlich für nahezu das gesamte Bayerwaldnetz zuständige Werk für die betriebsnahe Instandhaltung in Zwiesel, sodass auch nach/ vor Werkstattaufenthalten oder bei notwendigen Instandsetzungen am Wasserstoffsystem ein einfacher Zugang zur Tankstell besteht.



Abbildung 14: Bf Zwiesel mit Markierung einer möglichen Fläche, Google Earth Luftaufnahme

Die Prüfung im Bahnhofsumfeld Zwiesel ergab keinen direkt gleisnahen Standort bzw. bahneigene Flächen für eine Anlage mit der in Bremervörde entsprechenden Größe. Gegenüber des Bahnhofsgeländes an der Waldbahnstraße könnte sich jedoch eine mögliche Fläche ergeben (siehe Markierung in Abbildung 14), die jedoch noch auch keine Maße von 90x90 m zulässt. Andere Tankstellenlösungen sind jedoch im Flächenbedarf etwas kleiner, zudem wird die H₂-Versorgung im Bayerwaldnetz ohnehin aufgeteilt auf mind. zwei Tankstellenstandorte, sodass der einzelne Standort kleiner ausfallen kann als jener in Bremervörde (weniger Trailer-Stellplätze für externe Anlieferung (Backup), kleinere Erzeugungsanlage, weniger benötigtes Speichervolumen, etc.). Die Auswahl der Fläche einer möglichen Wasserstofftankstelle in Zwiesel müsste im weiteren Verlauf mit der Stadt und den betroffenen Grundstückseigentümern konkretisiert werden.

Für die Linie RB 38 sowie bei betrieblichen Störungen oder Teilungen des Netzes aufgrund von Bauarbeiten sowie aus Resilienzgründen für den Ausfall der Tank- oder Erzeugungsanlage in Zwiesel ist eine zweite Tankstelle im Netz Bayerwald vorzusehen, die ungefähr die halbe Netzleistung aufweisen sollte (Versorgung eines Teilnetzes, maßgeblich RB 38 und einzelne Fahrzeuge der RB 35). Deren Standort ergibt sich logischerweise aus dem Standort Viechtach an der RB 38 oder an dem weiteren Endpunkt der RB 35 in Plattling. Beide Standorte führen ggf. zu zusätzlichen Überführungsbedarfen der jeweiligen anderen Linie. Eine finale Standortempfehlung ist den Gutachtern zum derzeitigen Zeitpunkt nicht möglich, da hierfür insbesondere die geplante zukünftige Rolle des Instandhaltungsstandortes Viechtach Relevanz hat. Für eine Ansiedlung ebenda spräche, wenn das Werk weiterhin in die Instandhaltungskonzeption des Bayerwaldnetzes eingebunden würde. Sollte die Nutzung entfallen, ist ein Tankstandort am Rande des Netzes in Plattling vorteilhafter, da er Mitnutzungsmöglichkeiten für weitere Fahrzeuge außerhalb des Bayerwaldnetzes ermöglicht sowie eine deutlich einfachere Flächenverfügbarkeit aufweist (siehe Abbildung 16 und Abbildung

15). In Viechtach ist aus Sicht der Gutachter nur durch Umnutzung von Bestands-Flächen mit schon bestehender Bebauung realistisch eine Tankstellenanordnung möglich.



Abbildung 15: Bf Viechtach mit nahezu keinen möglichen Flächen, Google Earth Luftaufnahme

Hinweise des Betreibers Die Länderbahn lassen darauf schließen, dass die Flächen nördlich des Bahnhofs Viechtach teilweise zukünftig für eine entsprechende Nutzung zur Verfügung stehen könnten. Demgegenüber konnten in Gesprächen mit Vertretern der DB Netz für die durch die Gutachter als mögliche Standorte am Bahnhof Plattling identifizierten Flächen jedoch weitere Hürden benannt werden, da die Gleisflächen nördlich des Bahnhofs auch perspektivisch weiterhin im Bedarf der DB Netz enthalten sind. Südlich des Bahnhofs ist aus Sicht der DB-Netz-Vertreter der Anwohnerschutz bei notwendiger entsprechender Wasserstoffspeicherung voraussichtlich nicht entsprechend den normativen Anforderungen umzusetzen. Für beide Standorte wären deshalb bei Realisierung eines Wasserstoff-Konzepts deutlich tiefergehende Untersuchungen notwendig. Für den Bahnhof Plattling gilt dieser Untersuchungsbedarf insbesondere auch für die betriebliche Leistungsfähigkeit für Tank-Rangierfahrten im Bahnhof.

Die nach Aussagen des Betreibers Die Länderbahn geltenden Auflagen und tageszeitlichen Einschränkungen zum Anwohner-Lärmschutz für die Tankstelle in Zwiesel sind aus Sicht der Gutachter auch für Wasserstoff-Tankstellen-Standorte, unabhängig von Standort zu erwarten, sofern diese sich in der Nähe von Siedlungen befinden (in Zwiesel, Viechtach und Plattling gegeben).

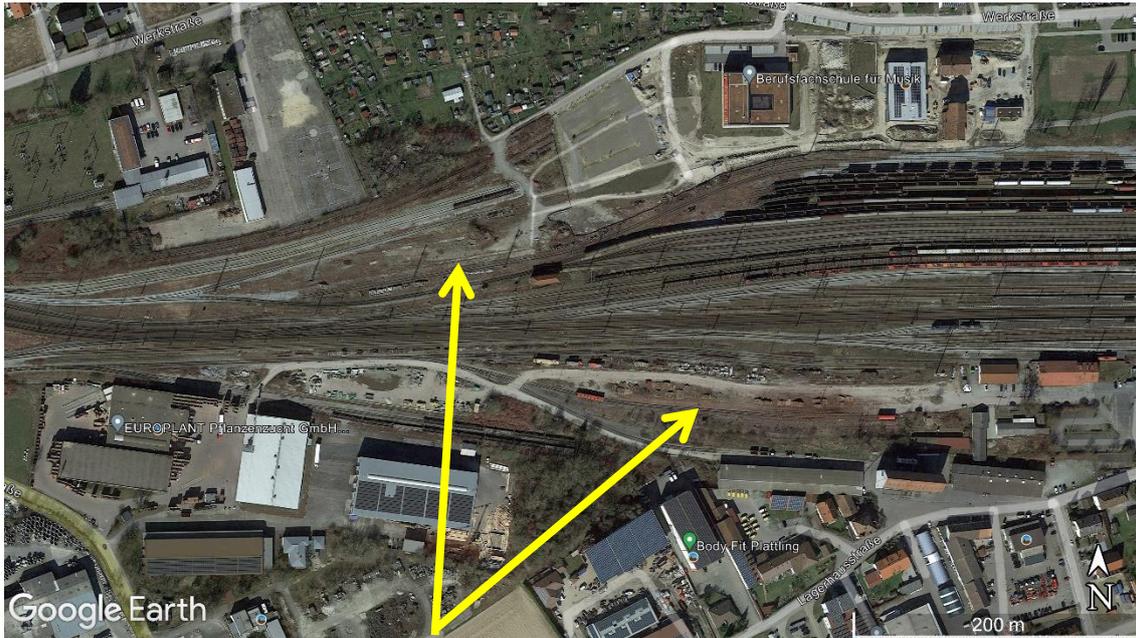


Abbildung 16: Bf Plattling mit Markierung möglicher Flächen, Google Earth Luftaufnahme

Da planmäßig gemäß Umlaufplanung der Bestandsfahrzeuge keine Umläufe der RB 35 und RB 38 in Plattling enden, wären hierfür Umlaufplan-Änderungen bzw. Fahrzeugwechsel untertags zur Tankzuführung notwendig. Beispielsweise wären von den sechs planmäßig benötigten Fahrzeugen auf der RB 35 (aktuell Anzahl im Bestand, ggf. bei Ersatz der RegioShuttle durch längere Fahrzeuge Reduzierung der Anzahl) vier Fahrzeuge plus die beiden auf der RB 38 verkehrenden Fahrzeuge für den Tankstandort in Plattling oder Viechtach vorzusehen.

6 Kostenermittlung und -vergleich

6.1 Methodik LCC

Eine detaillierte Beschreibung der Methodik der LCC-Analyse befindet sich bereits im Ausgangsbericht (2022-12-19 *BEG Bayerwald Bericht_2022-618350-659.0_fin Kap 8.1*).

6.2 Fahrzeugbezogene Kosten

Eine Beschreibung der Bedeutung der Kostenparameter der Fahrzeuge befindet sich bereits im Ausgangsbericht (2022-12-19 *BEG Bayerwald Bericht_2022-618350-659.0_fin Kap 8.2*). Die Kostenparameter wurden in Abstimmung mit Herstellervertretern während der Bearbeitung der vorliegenden Untersuchung weiter präzisiert und auf aktuell zu erwartende Kosten angepasst.

Die fahrzeugspezifischen Kostensätze finden sich in Anlage 25 bis Anlage 26.

6.3 Infrastrukturbezogene Kosten

Die berücksichtigten Kostenparameter der BEMU-Infrastruktur sind im Ausgangsbericht detailliert aufgeführt (2022-12-19 *BEG Bayerwald Bericht_2022-618350-659.0_fin Kap 8.3.1*). In Anlage 27 bis Anlage 29 findet sich eine detaillierte Aufstellung der Kostenanteile je BEMU-Infrastruktur-Maßnahme unter Berücksichtigung der Vollelektrifizierung im tschechischen Streckenabschnitt.

Folgende BEMU-Infrastrukturmaßnahmen wurden je Linie unterstellt, wobei die entsprechenden Kosten für die Einzelmaßnahmen in Tabelle 4 aufgeführt sind. Dort sind auch die bisher angesetzten Kosten in der Ausgangsstudie gegenübergestellt.

- **Plattling – Zwiesel – Bayerisch Eisenstein – (Klatovy)**,
72 km (bzw. 121 km), RB 35
 - Oberleitungsinselfanlage (OLIA) Bettmannsäge – Zwiesel
Ansatz: reduzierter Baukostenzuschuss für 8 MW statt 10 MW Anschlussleistung der OLIA
 - Vollelektrifizierung des tschechischen Linienanteils von Klatovy bis Bayerisch Eisenstein/ Železná Ruda-Alžbětín
→ es wurden keine Kosten für die Elektrifizierung auf tschechischer Seite angesetzt, jedoch für die Elektrifizierung des deutschen Bahnhofsteils in Bayerisch Eisenstein
- **Zwiesel – Grafenau**, 31,5 km, RB 36
 - Mitnutzung Ladeinsel Bettmannsäge – Zwiesel
 - Ladestation Grafenau
- **Zwiesel – Bodenmais**, 14,5 km, RB 37

- Mitnutzung Ladeinsel Bettmannsäge – Zwiesel
- **Gotteszell – Viechtach**, 0,4 km (DB Netz AG), 24,4 km (DLB), RB 38
 - Ladestation Viechtach
- **Vorhandene Bestands-Oberleitung**
 - Plattling (15 kV 16,7 Hz) und Klatovy (25 kV 50 Hz)

Tabelle 4: Kostensätze BEMU-Infrastrukturmaßnahmen

notwendige BEMU- Infrastrukturmaßnahmen in Deutschland	angesetzte Kosten (ca.)	
	Szenario in CZ: OLIA Nyrsko	Szenario in CZ: Vollelektrifiziert
Gesamtsumme BEMU- Infrastrukturmaßnahmen ohne Finanzierungskosten	31,76 Mio. €	26,46 Mio. €
RB 35/36/37 OLIA Zwiesel: Vollständige Länge Bettmannsäge bis Ludwigsthal	25,3 Mio. €	-
RB 35/36/37 OLIA Zwiesel: Teil-Länge Bettmannsäge bis Zwiesel	-	18,1 Mio. €
RB 35: Deutscher Anteil an der Elektrifizierung des Bahnhofs Bayerisch Eisenstein	-	1,9 Mio. €
RB 36: Ladestation Grafenau (+ Mitnutzung OLIA Zwiesel)	3,16 Mio. €	
RB 37: nutzt OLIA Zwiesel mit	-	
RB 38: Ladestation Viechtach	3,30 Mio. €	
notwendige BEMU- Infrastrukturmaßnahmen in Tschechien	(siehe oben)	(siehe oben)
RB 35 OLIA Nyrsko (Angabe zur Wahrung Vergleich- barkeit mit Ausgangsstudie)	7,0 Mio. €	
RB 35 Vollelektrifizierung des tschechischen Abschnittes		(keine Angabe, da durch CZ getragen)

Für die Versorgung der Wasserstoff-/ Batterie-Hybridfahrzeuge wurden je eine Tankstelle in Zwiesel und in Plattling oder Viechtach unterstellt (zum Standort siehe Kapitel 5.6), die jeweils für ca. die Hälfte der Flotte an Spitzentagen (Freitag) ausgelegt sind. Der Gesamt-Bedarf des Netzes solcher Tage liegt bei

ca. 1.900 kg H₂, sodass jeweils die Anlagen für ca. 1000 kg H₂ pro Tag kosten-
seitig berücksichtigt wurden. Daraus ergeben sich Kosten von jeweils ca. 9,5 Mio.
€ (Preisstand 2022) bei einer Vor-Ort-Erzeugung des Wasserstoffes. Sollte
ausschließlich oder teilweise auf Lieferwasserstoff gesetzt werden, so gehen die
Gutachter von einer Kosten-Reduktion von je ca. 3 bis 3,5 Mio. € aus. Die Kosten
basieren auf verschiedenen öffentlichen und nichtöffentlichen Studien und
Kostensätzen, die den Gutachtern zur Errichtung von Wasserstoff-Tankstellen
vorliegen, bspw. aus Schleswig-Holstein⁵². So ergeben sich für die reine
Tankstelle für das Taunus-Netz (ohne Erzeugungs- und Aufbereitungsanlagen
im Industriepark Höchst, da bereits existent) gemäß ⁵³ Kosten von ca. vier
Millionen Euro. Für Anlagen mit entsprechender Erzeugungs- und Aufbereitungs-
Anlagentechnik ergeben sich je nach unterstelltem Fördersatz gemäß
veröffentlichten Fördersummen 7,17 bis 10,75 Mio. Euro. Ergänzt werden
angenommenen Werte durch nichtöffentliche Studien zu verschiedenen SPNV-
Netzen aus Betreiber- und Aufgabenträgerperspektive, die ähnliche Kostensätze
erwarten lassen.

Tabelle 5: Kostensätze FCMU-Infrastrukturmaßnahmen

notwendige Infrastruktur- maßnahmen FCMU (nur in D Infrastruktur vorgesehen)	angesetzte Kosten (ca.)	
	Szenario mit Vor- Ort-Erzeugung	Szenario mit Liefer-H ₂
Gesamtsumme FCMU- Infrastrukturmaßnahmen	19 Mio. €	12 bis 13 Mio. €
RB 35/36/37 Tankstelle Zwiesel	9,5 Mio. €	6 bis 6,5 Mio. €
RB 35/38 Tankstelle Plattling oder Viechtach	9,5 Mio. €	6 bis 6,5 Mio. €

6.4 Betriebskostenschätzung

Die Betriebskosten für die Fahrzeuge selbst (betriebsnahe und schwere Instand-
haltung, Tausch der Batterien bzw. PowerPacks etc.) wurde im Kapitel 6.2 darge-
stellt. Tabelle 6 zeigt die sonstigen angenommenen Rahmenbedingungen für den
Fahrzeugbetrieb und die Investitions- bzw. Betriebskostensteigerungen über 30
Jahre zum Preisstand im September 2023.

Dies bedeutet, dass gegenüber dem Ausgangsbericht bei den Energiekosten die
Preissteigerungen an den Futures-Energiehandelsbörsen für jetzt stattfindende
Energiekäufe in fünf bis sechs Jahren berücksichtigt wurden, die sich nach den

⁵² Ministerium für Wirtschaft, Verkehr, Arbeit, Technologie und Tourismus, Gutachten „H₂-
Mobilität und Förderrichtlinien Schleswig-Holstein“, 2020.

⁵³ <https://www.fr.de/frankfurt/weitere-wasserstoff-tankstelle-im-industriepark-hoechst-90971868.html>, zuletzt abgerufen am 17.10.2023.

kostenseitigen Verwerfungen des Ukraine-Krieges und den daraus folgenden Teuerungsraten ergeben haben.

Tabelle 6: Angenommene Rahmenbedingungen der Betriebskosten

Energieträger	Preis	Einheit
Dieselpreis Deutschland	1,70	€/l
Bahnstrompreis Deutschland	0,1616	€/kWh
Bahnstrompreis Tschechien (entspricht Industriestrompreis Deutschland)	0,2290	€/kWh
Öffentlicher Strompreis Deutschland	0,2290	€/kWh
Wasserstoffpreis	5	€/kg
HVO-100-Kostensteigerung ggü. konventionellem Diesel in Abhängigkeit der Annahmen-Streuung	0,17 ⁵⁴ bis 0,30	€/l
Nominalzins		2,0 %
Preissteigerungsrate (allgemein)		1,5 %
Preissteigerungsrate für Baugewerbe bei Infrastrukturinvestitionen		3,6 %
Kapitaldienst – Kreditrate Fzg.- & Infra.-Finanzierung (für 30 a)		1,75 %
Planungsleistungen (%-Anteil der Baukosten)		20 %

Die zu Beginn der kriegerischen Auseinandersetzung im Jahr 2022 in der Ukraine und die teilweise bereits vorher überproportional gestiegenen Energiekosten der nicht erneuerbaren Energie-Anteile am Strommix in Deutschland (v. a. für Erdgas als schnell regelbarer Anteil am Strommix → direkter Einfluss auf Betriebskosten der Netze als Regelenergie) führten zu überproportional gestiegenen Kosten für elektrische Energie beim Bahnstrom, der deutlich oberhalb der Steigerungen bei Dieselmotoren lag (siehe bspw. Quelle ⁵⁵, insbesondere Seiten 2 und 3 mit Kostensteigerungen von 14 – 16 ct/kWh im Mittel der letzten Jahre auf ca. 28 bis ca. 33 ct/kWh). Diese kurzfristigen Effekte wurden in den dargestellten Varianten des Wirtschaftlichkeitsvergleichs nicht berücksichtigt, da sie nicht in diesem Überschwing-Verhalten der Preise verblieben. Allerdings wurden folgende Veränderungen zur Ausgangsstudie berücksichtigt, die sich vor allem auf die Preisentwicklungen im Futures-Handel der Energiemärkte für die Jahre 2028 und 2029 beziehen:

⁵⁴ <https://www.verkehrsrundschau.de/nachrichten/nfz-fuhrpark/hvo-wie-wird-der-treibstoff-hergestellt-und-was-kostet-er-3314215>, zuletzt abgerufen am 20.11.2023.

⁵⁵ <https://die-gueterbahnen.com/assets/files/downloads/2022/nee-positionspapier-zur-bahnstrompreisentwicklung-stand-15.-maerz-202228.pdf>, zuletzt abgerufen im Juni 2022.

Bahnstrompreis:

- In Studie 2022 angesetzt **Bahnstrompreis: ca. 14,00 ct/kWh**
→ Entspricht einem Arbeitspreis für elektrische Energie von ca. 10,88 ct/kWh (Preis-Stand auf der Basis der aktuellen Abgabe-Praxis)
- Einkaufs-Arbeitspreis mit Stand 01.9.2023 für 2029: ca. 13,1 ct/kWh
→ Basis: Futures-Preise Energiehandelsbörse European Energy Exchange AG
- Deshalb aktualisiert angenommener **Bahnstrompreis: ca. 16,16 ct/kWh**
Abgezinst, jedoch Beibehaltung Steuern & Abgaben entspr. Stand 2022

Landesenergiestrompreis:

- In Studie 2022 angesetzt **Landesenergiestrompreis ab 2028: ca. 21,00 ct/kWh**
- Bei Übertrag der Bezugskosten elektr. Energie (s.o.): **ca. 22,90 ct/kWh**
→ Abgezinst, jedoch Beibehaltung Steuern & Abgaben entspr. Stand 2022

Dieselpreis:

- In Studie 2022 angesetzt: **ca. 1,17 €/l** → **aktualisiert: ca. 1,70 €/l**
- Die angesetzte Kostensteigerung setzt sich aus zwei wesentlichen Anteilen zusammen:
 - Bezugskostensteigerung für Kraftstoff nach Stopp der Roh-Öllieferungen aus der Russischen Föderation, sodass Eisenbahnverkehrsunternehmen heute den Bezug von Dieseldieselkraftstoff zwischen 1,40 und 1,50 EUR/Liter realisieren können, je nach Bezugsquelle (EVU-eigene Tankstellen oder Bezug über Tankstellen als Serviceeinrichtungen im übrigen Bahnnetz).
 - Stärkere Berücksichtigung der zu erwartenden Kostensteigerungen durch CO₂-Bepreisung und Teuerung, da auch beim Einkauf der elektrischen Energie Bezugsjahre Ende der 2020er-Jahre aufgrund der unterstellten Futures-Handelspreise angesetzt wurden.
- Dieseldieselkraftstoff wird in dieser Studie als Vergleichsbasis mitbetrachtet, in Abstimmung mit dem Auftraggeber gehen die Gutachter jedoch davon aus, dass kein weiterer Betrieb mit konventionellem Dieseldieselkraftstoff nach 2034 (Betriebsaufnahme) politisch und ökologisch vertretbar erscheint.

HVO-100-Kraftstoff-Preis (Kraftstoff aus 100 % Hydrotreated Vegetable Oil):

- Deshalb wird in der vorliegenden Studie auch ein Vergleichsszenario mit Mehrkosten ggü. konventionellem Dieseldieselkraftstoff mitbetrachtet. In Studie

2022 noch nicht berücksichtigt, wird jetzt eine Streuung der Mehrkosten ggü. konventionellem Dieseldieselkraftstoff von **0,17 €/l bis 0,30 €/l** angesetzt.

- Wie in der Ausgangsstudie aus dem Jahr 2022 ausgeführt, lassen sich Dieseltriebwagen auch mit sogenannten synthetischen oder biogenen Kraftstoffen betreiben, die teilweise oder vollständig Klimaneutral sind. Die Deutsche Bahn AG hat in verschiedenen Tochterunternehmen zwischenzeitlich teilweise vollständigen HVO-Betrieb in einzelnen Teilflotten umgesetzt. An 14 Tankstellen⁵⁶ im gesamten Bundesgebiet kann zwischenzeitlich HVO-Kraftstoff bei der DB Energie bezogen werden.
- Gemäß verschiedener Quellen (siehe z. B. ⁵⁴, ⁵⁷) sind aktuell am Markt Kostendifferenzen zwischen 15 und 20 Cent/Liter Kraftstoff ggü. konventionellem Dieseldieselkraftstoff ersichtlich, wobei weitere 1 bis 3 Prozent Mehrverbrauch (andere Quellen 0,5 bis 2 Prozent⁵⁸) weitere Kostensteigerungen im unteren einstelligen Centbereich zur Folge haben. Marktteilnehmer erwarten bei weiterer Verbreitung von HVO-Kraftstoffen Mehrkosten je Liter von ca. 30 Cent (siehe z. B. ⁵⁹).

6.5 Kostenvergleich DMU vs. BEMU vs. FCMU

6.5.1 Lebenszykluskostenuntersuchungen im Bayerwaldnetz

Die sich ausschließenden Investitionsvorhaben im Sinne dieser Untersuchung bestehen aus den folgenden verschiedenen Technologieoptionen:

- DMU (Dieselbetrieb als Referenzfall),
- BEMU (Einsatz batterieelektrischer Züge),
- FCMU (Einsatz wasserstoffbetriebener Züge).

Für diese Technologieoptionen wird eine relative Vorteilhaftigkeit ermittelt, indem für jede Technologie ein Kapitalwert für den gesamten Lebenszyklus bestimmt wird. Dieser umfasst alle Kosten, die im Lebenszyklus anfallen und technologie-spezifisch unterschiedlich sind, sodass der geringste Kapitalwert in dieser Untersuchung der relativ vorteilhafteste ist. Nicht untersucht werden Kosten, die

⁵⁶ <https://www.dbenergie.de/dbenergie-de/tankdienste/alternativeantriebskraftstoff>, zuletzt abgerufen am 20.11.2023.

⁵⁷ <https://hvo100.de/faq/>, zuletzt abgerufen am 20.11.2023.

⁵⁸ <https://www.dbcargo.com/rail-de-de/logistik-news/auf-dem-gruenen-weg-db-cargo-testet-hvo-7327204>, zuletzt abgerufen am 20.11.2023.

⁵⁹ <https://www.mobility-impacts.de/new-power/detail/news/hvo-statt-diesel-der-haken-bleibt-der-preis.html>, Artikel zu öffentlichem Vortrag beim EU Railpress-Forum 2023 durch DB Energie, zuletzt abgerufen am 20.11.2023.

für alle Technologien gleich sind wie bspw. Trassenkosten, Stationsgebühren oder Personalkosten.

Im folgenden Abschnitt werden verschiedene Varianten betrachtet und im Bayerwaldnetz für den Einsatz von BEMU oder FCMU gegenübergestellt und bewertet.

6.5.2 Betrachtete Fälle

Die Untersuchung wird in verschiedene Fälle gegliedert, wie diese bereits aus dem Ausgangsbericht bekannt sind (2022-12-19 *BEG Bayerwald Bericht_2022-618350-659.0_fin Kap 8.5.2*):

Fall 1 neu: Mit kurzen Fahrzeugen nur bis Bayerisch Eisenstein

- äquivalent zu Status Quo in Umlaufplan und Fahrzeugbedarf
- 15 Fahrzeuge (kurz, ca. 41 bis 46 m Länge) benötigt (inkl. 2 Reserve)
- im heutigen Umlaufplan erbrachte Leistungen in Doppeltraktion aus zwei RS1 weiterhin in Doppeltraktion
- Berücksichtigte Infrastrukturinvestitionen:
 - OLIA Zwiesel (Differenziert: nicht verkürzt und verkürzt)
 - Elektrifizierung des deutschen Teils des Bf Bayerisch Eisenstein
 - Ladestation in Grafenau
 - Ladestation in Viechtach

Zusatz Fall 1a neu: Nutzung eines ggf. gegebenen Einsparpotentials durch Verzicht auf Doppeltraktionen der Linie RB 35, sonst identisch zu *Fall 1 neu*

- bei Doppeltraktionen im Status Quo der RB 35 wird stattdessen in Einfachtraktion gefahren (kurze Fahrzeuge) → Verzicht auf 2 Fzge.
- 2x77 Sitzplätze (154, inkl. 12 Klappsitze) ggü. 1x123 Sitzplätzen (SH), identische Anzahl an Fahrradstellplätzen 2x6 bzw. 1x12 Stellplätze

Fall 2 neu: Mit kurzen Fahrzeugen und Durchbindung RB35 bis Klatovy

- 19 Fahrzeuge (kurz, ca. 41 bis 46 m Länge) benötigt (inkl. 3 Reserve)
- im heutigen Umlaufplan erbrachte Leistungen in Doppeltraktion aus zwei RS1 weiterhin in Doppeltraktion
- Berücksichtigte Infrastrukturinvestitionen:
 - OL-Verlängerung Plattling – Deggendorf
 - OLIA Zwiesel (Differenziert: nicht verkürzt und verkürzt)
 - Elektrifizierung des deutschen Teils des Bf Bayerisch Eisenstein
 - Ladestation in Grafenau
 - Ladestation in Viechtach
- keine Berücksichtigung der Durchbindungen nach Pilsen und Prag

Zusatz Fall 2a neu: Nutzung eines ggf. gegebenen Einsparpotentials durch Verzicht auf Doppeltraktionen der Linie RB 35, sonst identisch zu *Fall 2 neu*

- bei Doppeltraktionen im Status Quo der RB 35 wird stattdessen in Einfachtraktion gefahren (kurze Fahrzeuge) → Verzicht auf 2 Fzge.

- 2x77 Sitzplätze (154, inkl. 12 Klappsitze) ggü. 1x123 Sitzplätzen (SH), identische Anzahl an Fahrradstellplätzen 2x6 bzw. 1x12 Stellplätze

Fall 3 neu: Mit langen Fahrzeugen und Durchbindung der RB35 bis Klatovy

- 17 Fahrzeuge (lang, ca. 54 bis 58 m Länge) benötigt (inkl. 3 Reserve)
- wenn im Status Quo der RB 35 Doppeltraktionen vorgesehen sind wird in Einfachtraktion (lange Fahrzeuge) gefahren → Verzicht auf 2 Fzge.
- Berücksichtigte Infrastrukturinvestitionen:
 - OL-Verlängerung Plattling – Deggendorf
 - OLIA Zwiesel (Differenziert: nicht verkürzt und verkürzt)
 - Elektrifizierung des deutschen Teils des Bf Bayerisch Eisenstein
 - Ladestation in Grafenau
 - Ladestation in Viechtach
- 2x77 Sitzplätze (154, inkl. 12 Klappsitze) ggü. 1x ca. 150 bis 160 Sitzplätzen und ähnlicher Anzahl an Fahrradstellplätzen (bisher 2x6)

6.5.3 Ergebnisse des Wirtschaftlichkeitsvergleichs

Fall 1 neu:

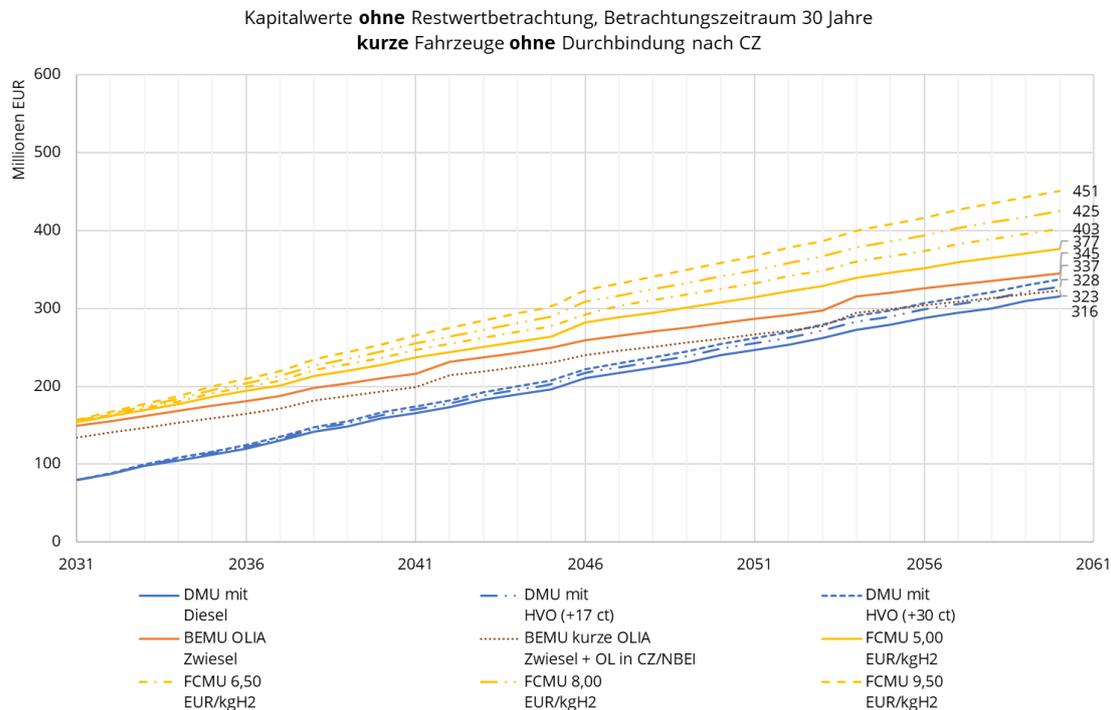


Abbildung 17: Ergebnis Fall 1 neu ohne Restwertbetrachtung (keine Durchbindung nach CZ)

Abbildung 17 zeigt die Ergebnisse für DMU-, BEMU- und FCMU-Verkehr bei einem Betrieb der RB 35 nur bis Bayerisch Eisenstein mit kurzen Fahrzeugen und dem Verzicht auf Infrastrukturmaßnahmen außerhalb der OLIA Zwiesel auf dieser Linie. Die Bestandstechnologie mit DMU und konventionellem Kraftstoff ist auf dem ab 2022 prognostizierbaren Preisstand noch günstiger als BEMU-Verkehre, was insbesondere an den hohen Erstinvestitionskosten für den Ausbau der Ladeinfrastruktur liegt. Hinzu kommen höhere Erstinvestitionskosten für BEMU im Vergleich zu DMU, trotz des Ansatzes von Lint 41 mit ca. 42 m anstatt ca. 26 m Länge der RS 1.

Jedoch wird davon ausgegangen, dass kein weiterer Betrieb mit konventionellem Dieselmotorkraftstoff nach 2034 politisch und ökologisch vertretbar erscheint, sodass die Mehrkosten für einen klimaneutralen HVO-Betrieb der DMU deren Betrieb weniger wirtschaftlich werden lassen als ein BEMU-Betrieb. FCMU bieten aufgrund der hohen Energiekosten, den deutlich höheren Fahrzeuginvestitionen sowie den verhältnismäßig hohen betriebsnahen und schweren Instandhaltungskosten keinen wirtschaftlichen Vorteil.

Die in einem BEMU-Fall (BEMU kurze OLIA Zwiesel + OL in CZ/NBEI) unterstellte Vollelektrifizierung auf dem tschechischen Abschnitt der RB 35 führt zu einer Lademöglichkeit in Bahnhof Bayerisch Eisenstein und ermöglicht, wie im Abschnitt 5.2 erläutert, den Verzicht auf die Fahrleitung der OLIA Zwiesel im Abschnitt Zwiesel – Ludwigsthal. Durch die Nutzung dieser Lademöglichkeit sind

durch Einsparungen bei den Investitionen in die Oberleitungsanlage und der Finanzierung derselben, Einsparungen von ca. 22 Mio. EUR im Betrachtungszeitraum möglich.

Deutlich wird außerdem, dass trotz der optimistischen Annahme von Wasserstoffbezugskosten von 5,00 EUR/kgH₂ (siehe hierzu bspw. Quelle ⁶⁰) keine wirtschaftlichen Vorteile durch den FCMU generiert werden können. Werden wahrscheinlichere Wasserstoffkosten zwischen sechs und acht EUR/kgH₂ angesetzt, so verschiebt sich die Kapitalwertdifferenz zwischen der günstigsten BEMU-Variante (RB 35: OLIA Bettmannsäge – Zwiesel + Voll-Elektrifizierung im tschechischen Abschnitt, dadurch Lademöglichkeit in Bayerisch Eisenstein - NBEI) und den FCMU-Varianten von 54 Mio. EUR auf bis zu über 120 Mio. EUR.

Wird die in der Ausgangsstudie als günstige BEMU-Variante ermittelte Infrastrukturkonzeption angesetzt (Kennlinie OLIA Zwiesel, d. h. OLIA Bettmannsäge – Ludwigsthal), so ist diese ca. 54 Mio. EUR günstiger als die günstigste FCMU-Variante mit einem Wasserstoffpreis von 5 EUR/kgH₂.

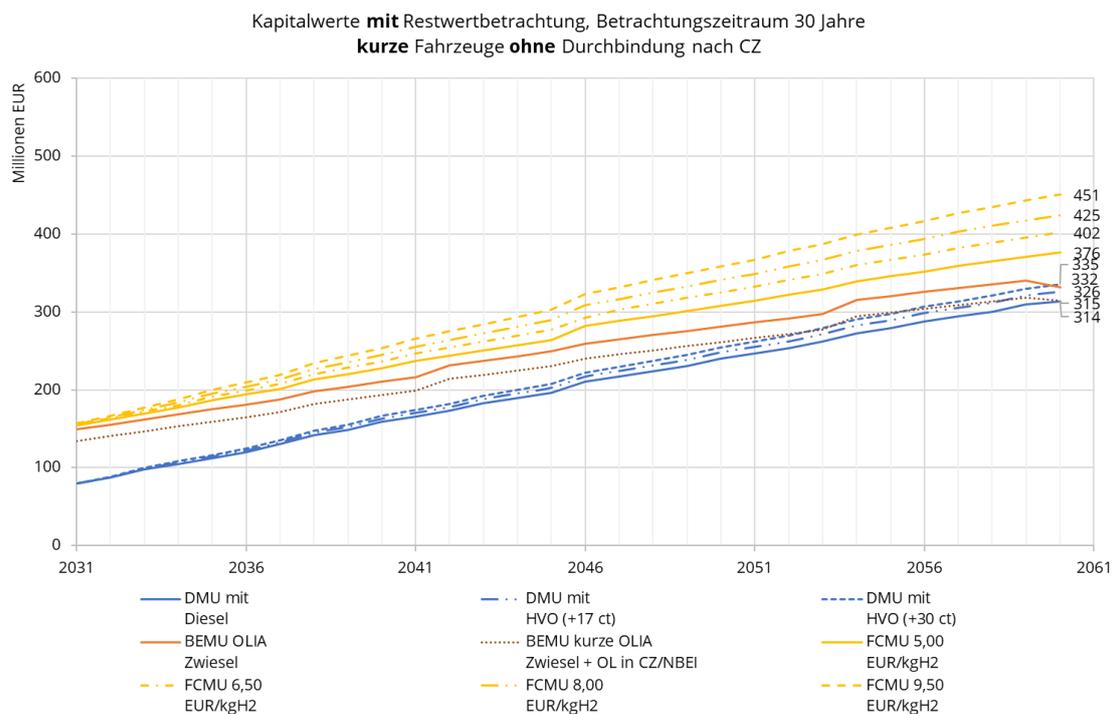


Abbildung 18: Ergebnis Fall 1 neu mit Restwertbetrachtung (keine Durchbindung nach CZ)

Werden die in Abbildung 18 dargestellten Restwerte noch mit in die Bewertung einbezogen, so verstärkt sich dieser Effekt sogar noch, da die verbleibende

⁶⁰ <https://www.handelsblatt.com/unternehmen/energie/bcg-studie-gruener-wasserstoff-ist-deutlich-teurer-als-gedacht/29443386.html>, zuletzt abgerufen am 18.10.2023.

Infrastrukturanlage für BEMU noch einen höheren Restwert besitzt als die in der Investition günstigeren Wasserstoff-Tankstellen.

Es ist außerdem gut zu erkennen, dass die günstigste BEMU-Variante (RB 35: OLIA Bettmannsäge – Zwiesel + Voll-Elektrifizierung im tschechischen Abschnitt, dadurch Lademöglichkeit in Bayerisch Eisenstein – NBEI) auch mit dem angesetzten konventionellen Diesel-Betriebsszenario wirtschaftlich gleichauf liegen. Wird der HVO-Betrieb unterstellt, ist der BEMU-Betrieb noch wirtschaftlicher als ohne Berücksichtigung der Anlagenrestwerte.

Fall 1a neu:

Wird angenommen, dass durch die im Vergleich zum Bestandsfahrzeug RS 1 deutlich größeren Fahrzeuge der 41- bis 46-m-Klasse den Einsatz von Doppeltraktionen auf der Linie RB 35 obsolet machen können, so führt können zwei Fahrzeuge im Umlauf pro Tag eingespart werden. Dies wirkt sich folgendermaßen aus:

- Einsparung bei der Fahrzeuginvestition in zwei Fahrzeuge (
 - o Reduzierung der Investition in Fahrzeuge um knapp 14 Mio. + 5,5 Mio. EUR Finanzierungskosten bei BEMU
 - o Reduzierung der Investition in Fahrzeuge um knapp 17 Mio. + 6,8 Mio. EUR Finanzierungskosten bei FCMU
- Reduzierung um ca. 300 Tsd. Fzg-km pro Jahr, d. h. vor allem Senkung der Betriebskosten für betriebsnahe und schwere Instandhaltung, Energiebedarf etc.

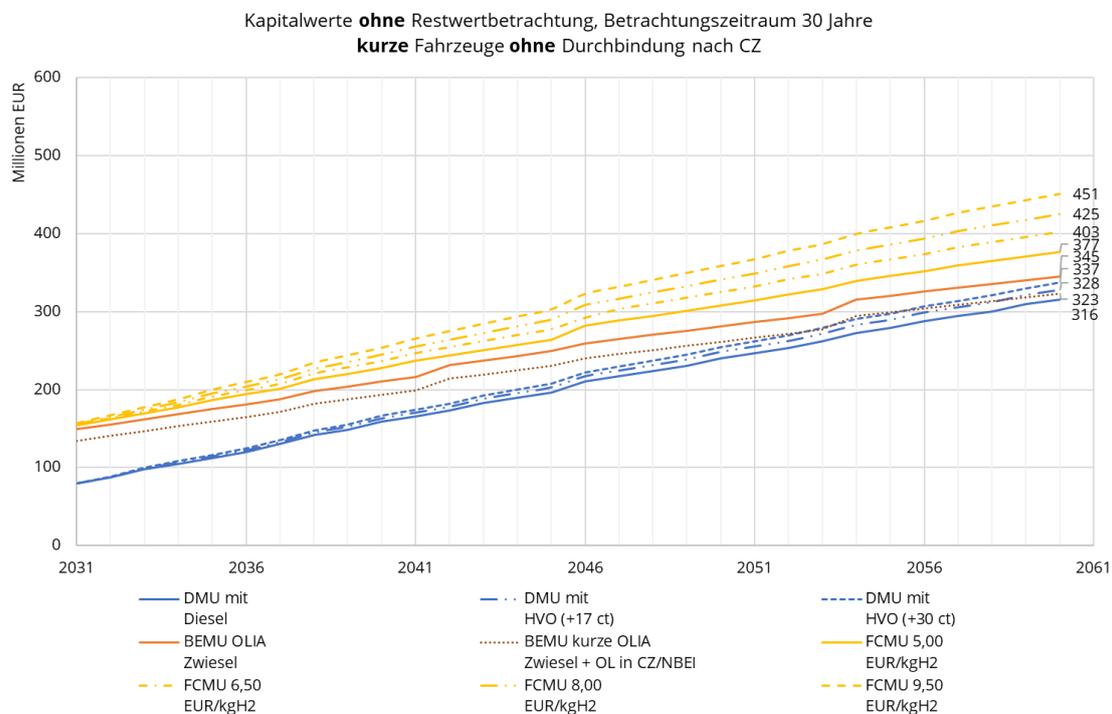


Abbildung 19: Ergebnis Fall 1a neu ohne Restwertbetrachtung (keine Durchbindung nach CZ)

Wie Abbildung 19 zeigt, lassen sich durch Reduzierung der Doppeltraktionsnotwendigkeit durch die größeren Fahrzeuge beim Verzicht auf zwei zusätzlich Fahrzeuge dafür potenziell bis zu 38 Mio. EUR beim BEMU-Betrieb und bis zu 45 Mio. EUR beim FCMU-Betrieb einsparen.

Fall 2 neu:

Wird die Durchbindung über Bayerisch Eisenstein hinaus bis Klatovy unterstellt bei gleichzeitiger Vollelektrifizierung ab Bayerisch Eisenstein bis Klatovy mit einem neuen Unterwerk bei Dešenice, so steigen die Kapitalwerte des wirtschaftlich günstigsten BEMU-Betriebes um ca. 71 Mio. EUR im Betrachtungszeitraum an.

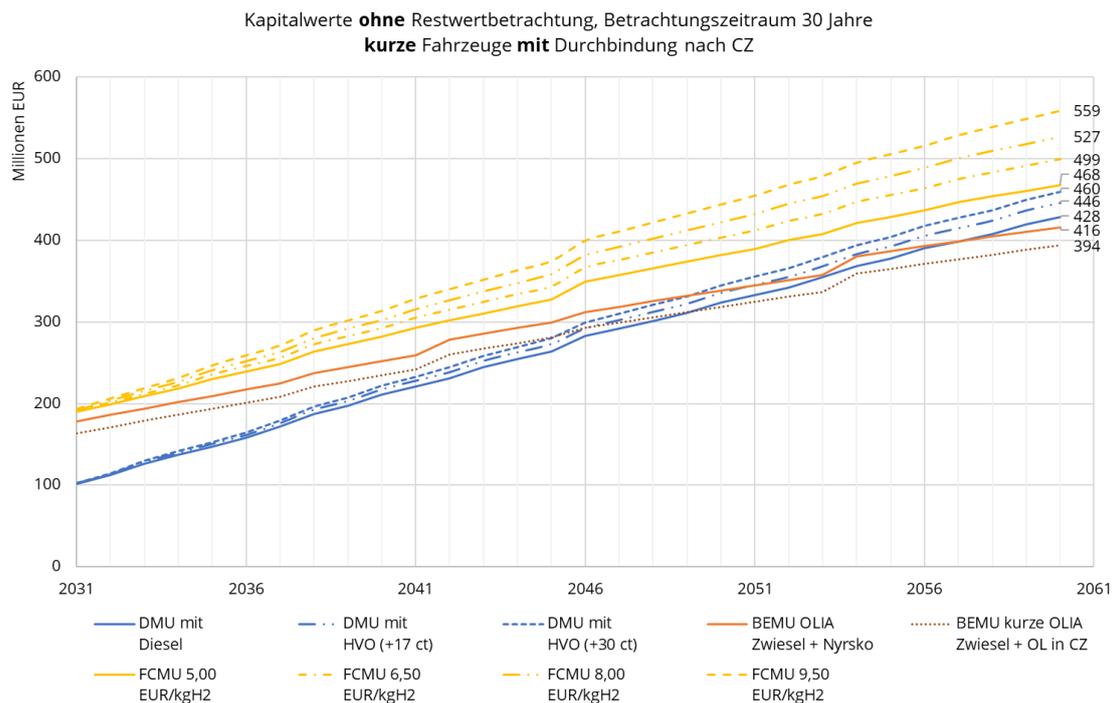


Abbildung 20: Ergebnis Fall 2 neu ohne Restwertbetrachtung (Durchbindung nach CZ)

Die Vollelektrifizierung ermöglicht vor allem dem Verzicht auf die Oberleitungsin-selanlage (OLIA) rund um Nyrsko bzw. die verkleinert die Ausdehnung der OLIA Zwiesel auf den Abschnitt Bettmannsäge – Ludwigsthal. Für die Kosten des Energiebezugs ist vor allem der Bahnstromenergiepreis in Tschechien relevant, der in der vorliegenden Studie dem Industriestrompreis in Deutschland gleich-gestellt wurde.

Durch diesen verhältnismäßig hohen Strompreis fallen die Einsparungen im Betrieb ggü. einem reinen Batteriebetrieb mit ca. 22 Mio. EUR geringer aus als ggf. erwartet. Es gilt deshalb Potenziale zum Bezug günstigen Bahnstroms unterhalb der Industriestrompreis an der Oberleitung auf tschechischer Seite zu erschließen, sodass der effiziente Energiebezug an der Oberleitung noch größere Einspareffekte erzielen kann. In den um 22 Mio. EUR reduzierten Kosten sind nämlich außerdem bereits der Verzicht auf die OLIA bei Nyrsko sowie den Abschnitt Zwiesel – Ludwigsthal enthalten. Die in Abbildung 21 dargestellten

Kapitalwerte inkl. berücksichtigten Restwerten bestätigen einerseits den wirtschaftlichen Vorteil von BEMU im Bayerwaldnetz, auch bei Durchbindung der Linie RB 35 bis Klatovy, andererseits auch die wirtschaftlichen Vorteile einer Vollelektrifizierung auf die Betriebskosten einer Durchbindung bis nach Klatovy.

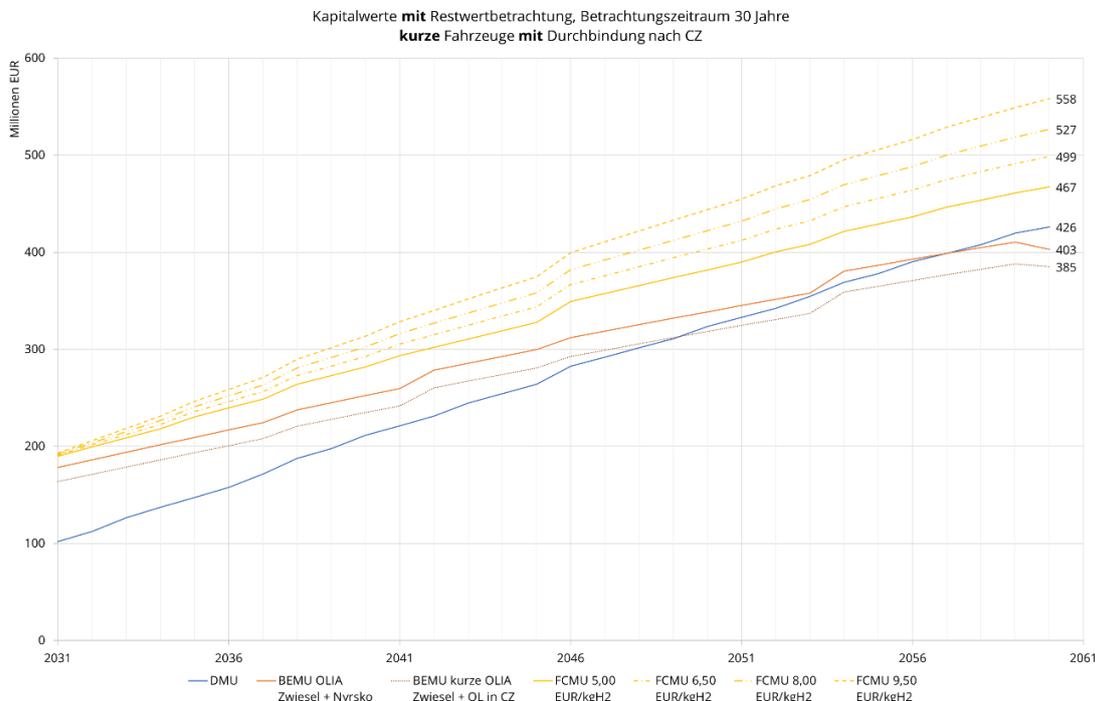


Abbildung 21: Ergebnis Fall 2 neu mit Restwertbetrachtung (Durchbindung nach CZ)

Fall 2a neu:

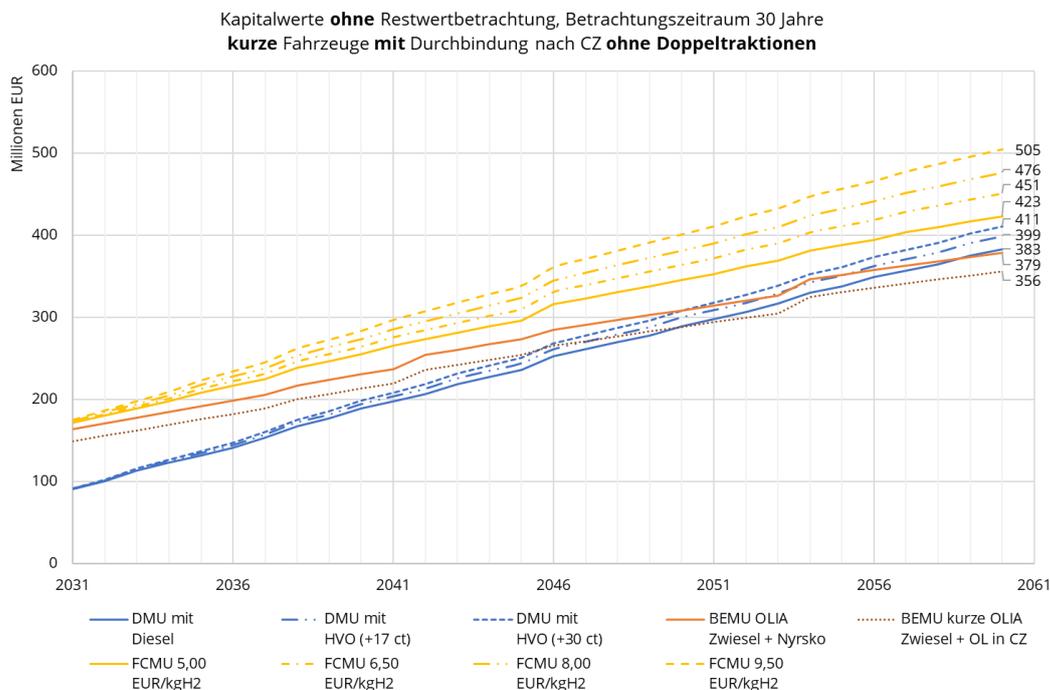


Abbildung 22: Ergebnis Fall 2a neu ohne Restwertbetrachtung (Durchbindung nach CZ)

Die im Fall 1a neu festgestellten wirtschaftlichen Vorteile eines Verzichts auf Doppeltraktionen der RB 35 bestätigen sich auch im Fall 2a neu bei unterstellter Durchbindung der Verkehre bis Klatovy, wie Abbildung 22 zeigt.

Fall 2 neu – Kostenvariation Wasserstofffahrzeuge

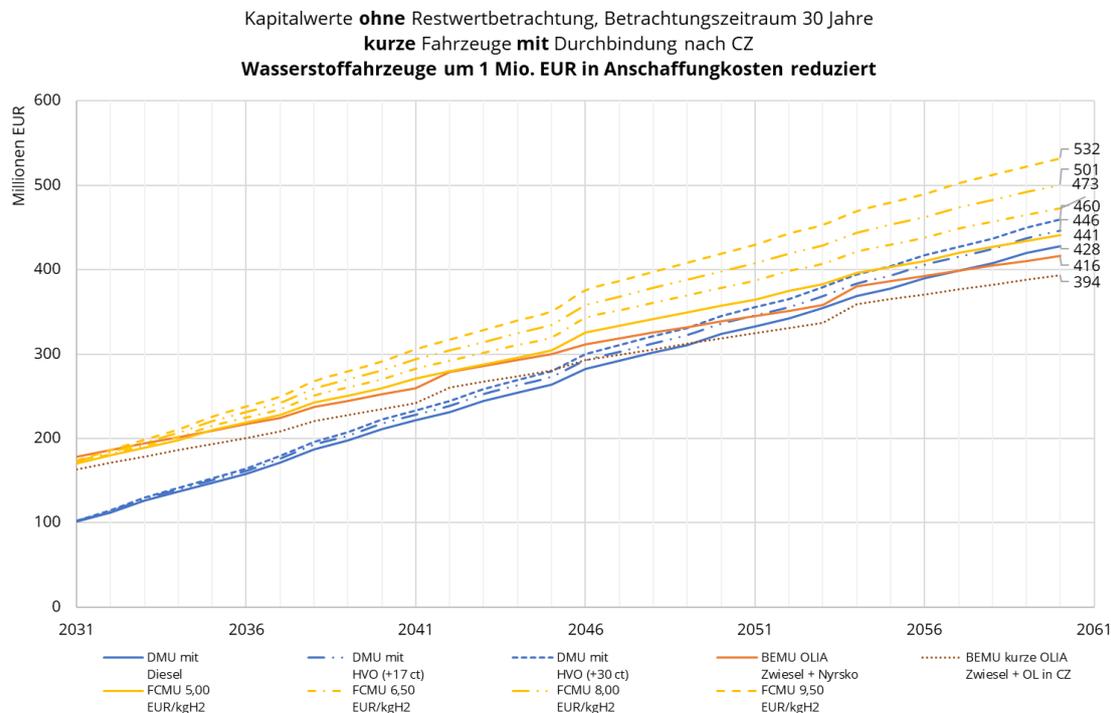


Abbildung 23: Ergebnis Fall 2 neu ohne Restwertbetrachtung – Preisreduzierung je FCMU (Fahrzeug) um je 1 Mio. EUR

Die angegebenen Fahrzeugkosten für Wasserstofffahrzeuge von deutlich über acht Millionen Euro je Fahrzeug stellen eine hohe Umsetzungshürde für Wasserstoff-/Batterie-Hybridfahrzeuge dar. Um überproportional negative Effekte durch die hohen Investitionskosten je Fahrzeug für diese Technologie abschätzen und ggf. ausschließen zu können, wurde, wie in Abbildung 23 dargestellt, bei den Investitionskosten je Fahrzeug jeweils eine Million Euro Kostenreduktion unterstellt. Trotz dieser hohen Einsparung von über 10 % je Fahrzeug (zzgl. der damit einhergehenden Finanzierungskosten-Einsparungen), können noch keine wirtschaftlichen Vorteile für FCMU erreicht werden im Bayerwaldnetz.

Fall 3 neu:

In der Ausgangsstudie wurde zum Verzicht auf die OLIA Nyrsko auch untersucht, ob ein Betrieb mit längeren BEMU im gesamten Netz durch die damit einhergehenden größeren Energiespeicher ggf. Kosteneinsparungen generieren kann. Bereits in der Ausgangsstudie konnte gezeigt werden, dass dies nicht der Fall ist. Vergleicht man die Fälle 2 neu und 3 neu, so ergeben sich höhere Kosten für den BEMU-Betrieb um ca. 50 Mio. EUR, der FCMU-Betrieb wird jedoch ca. 6 Mio. EUR (vergleiche Abbildung 20 und Abbildung 24) günstiger aufgrund der geringen Anzahl an notwendigen Fahrzeugen (äquivalent zu Fall 2a neu).

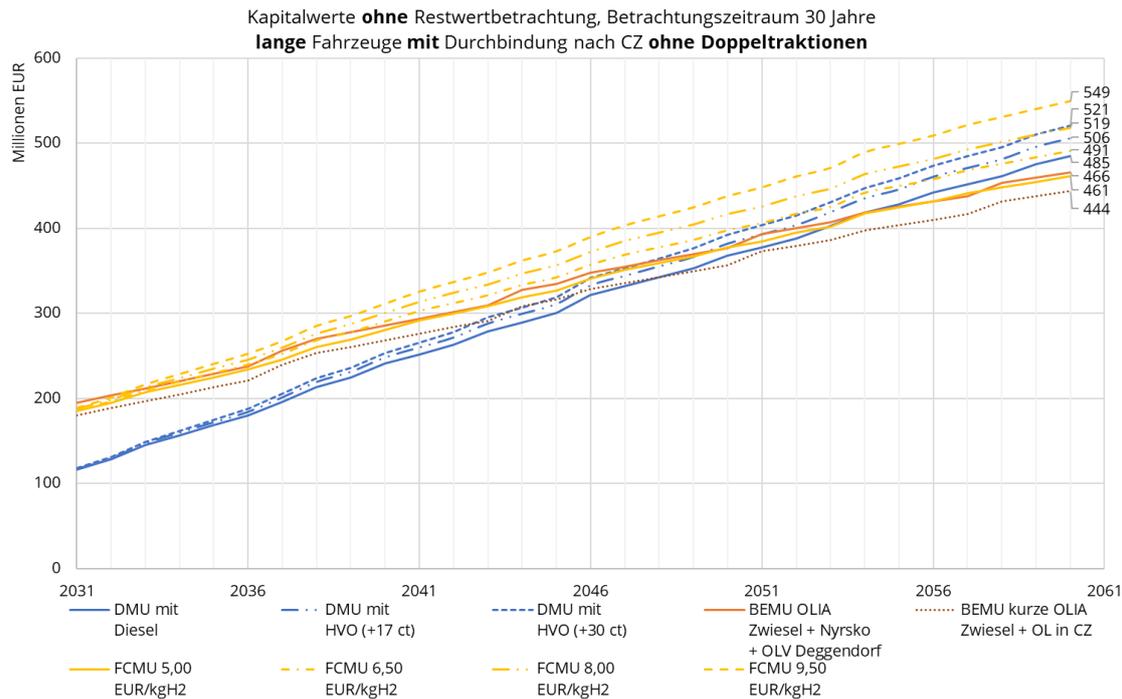


Abbildung 24: Ergebnis Fall 3 neu ohne Restwertbetracht. (Durchbind. nach CZ, lange Fzge.)

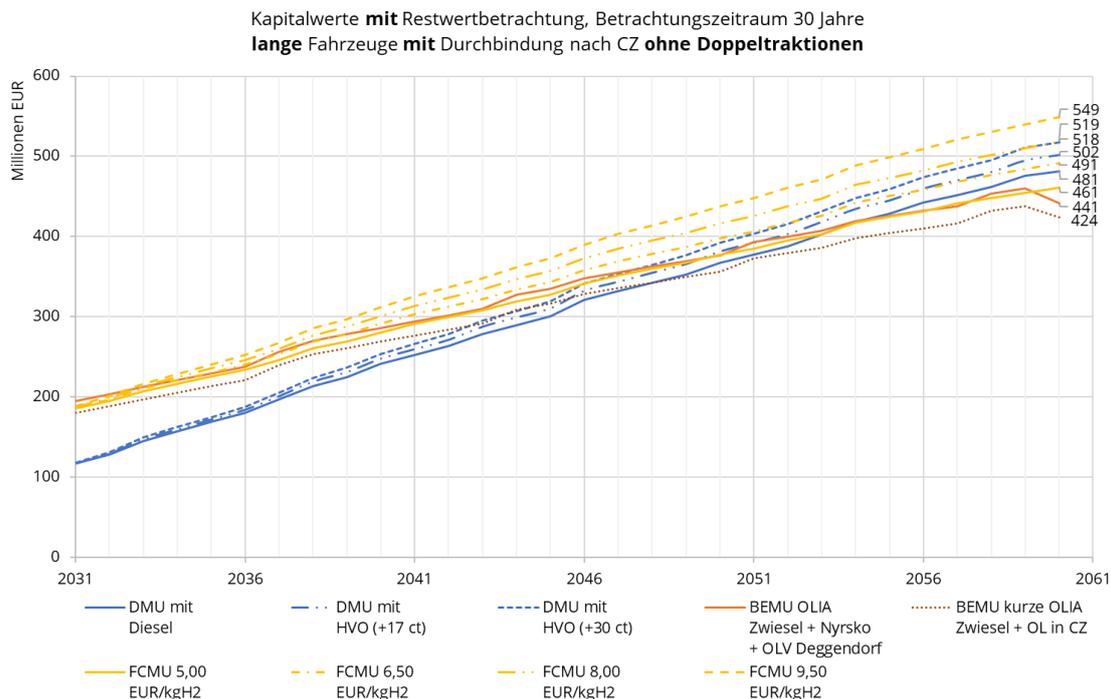


Abbildung 25: Ergebnis Fall 3 neu mit Restwertbetrachtung (Durchbind. nach CZ, lange Fzge.)

Besonderheit beim Fall 3 neu ist, dass durch die Kostenreduktion beim FCMU-Betrieb dieser in den Bereich der Wirtschaftlichkeit des Betriebes mit BEMU kommt, jedoch auf einem **gesamthaft höheren** Kostenniveau als beim Fall 2

neu, der somit wirtschaftlicher ist. Es können somit keine wirtschaftlichen Vorteile durch die Nutzung langer BEMU oder FCMU generiert werden.

6.5.4 Zusammenfassung/ Übersichten Wirtschaftlichkeitsvergleiche

Die folgenden Grafiken zeigen in besserer Übersichtlichkeit nochmal die im Abschnitt 6.5.3 dargestellten Ergebnisse durch Balkendiagramme und werden deshalb nicht detailliert kommentiert. Es sind darin jeweils die Minimalwerte des Gesamtvergleichs sowie die Infrastrukturkostenanteile hervorgehoben.

Die folgenden Darstellungen enthalten die Infrastrukturkosten (Balken mit kräftigerer farblicher Darstellung) inklusive der jeweils unterstellten Finanzierungskosten derselben am Kapitalmarkt durch Anleihen, Kredite o. Ä. zu einem unterstellten, langjährig festgelegten jährlichen Finanzierungszins von 1,75 %.

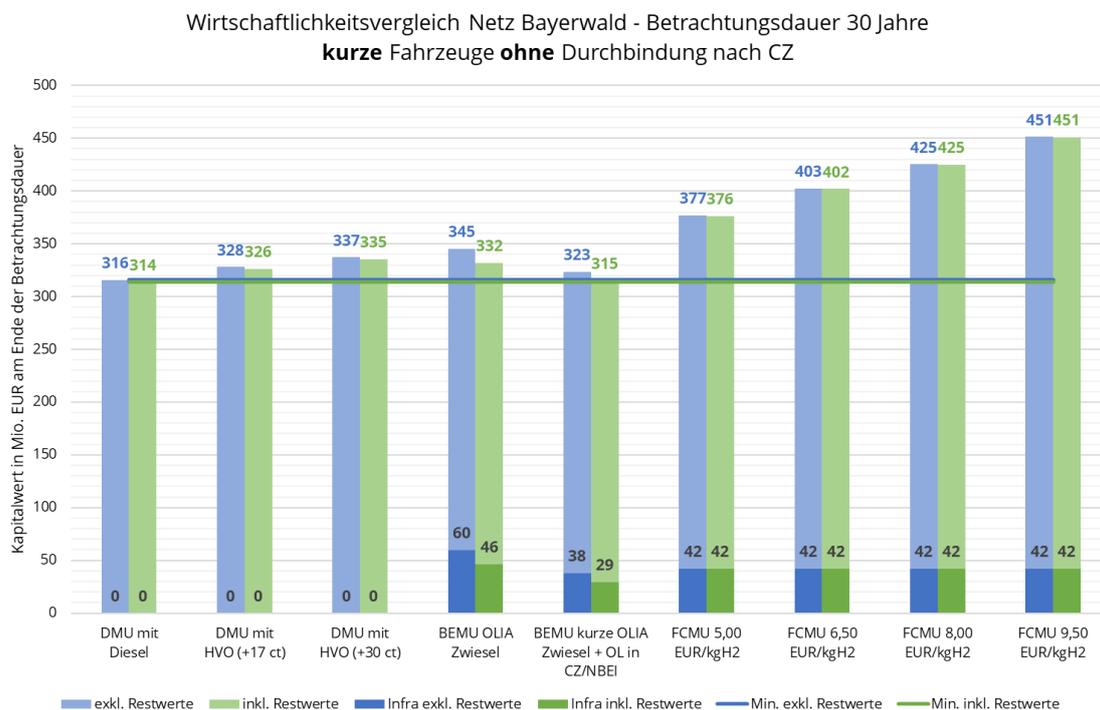


Abbildung 26: Ergebnis Fall 1 neu (ohne Durchbindung nach CZ, kurze Fahrzeuge)

Wirtschaftlichkeitsvergleich Netz Bayerwald - Betrachtungsdauer 30 Jahre
kurze Fahrzeuge ohne Durchbindung nach CZ ohne Doppeltraktionen

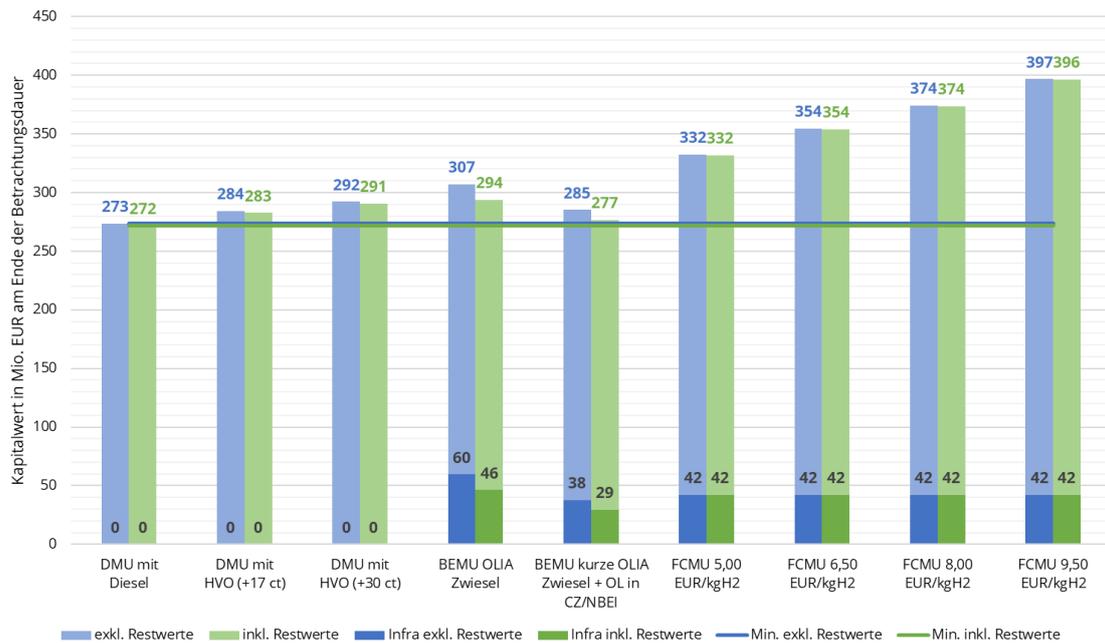


Abbildung 27: Ergebnis Fall 1a neu (ohne Durchbindung nach CZ, kurze Fahrzeuge)

Wirtschaftlichkeitsvergleich Netz Bayerwald - Betrachtungsdauer 30 Jahre
kurze Fahrzeuge mit Durchbindung nach CZ

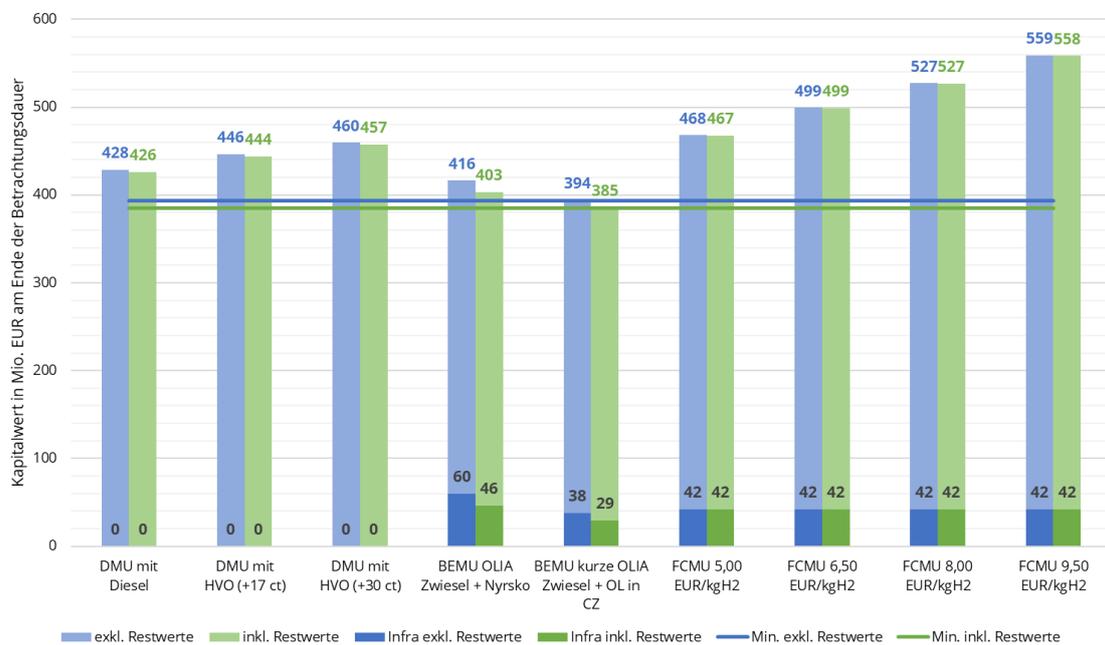


Abbildung 28: Ergebnis Fall 2 neu (mit Durchbindung nach CZ, kurze Fahrzeuge)

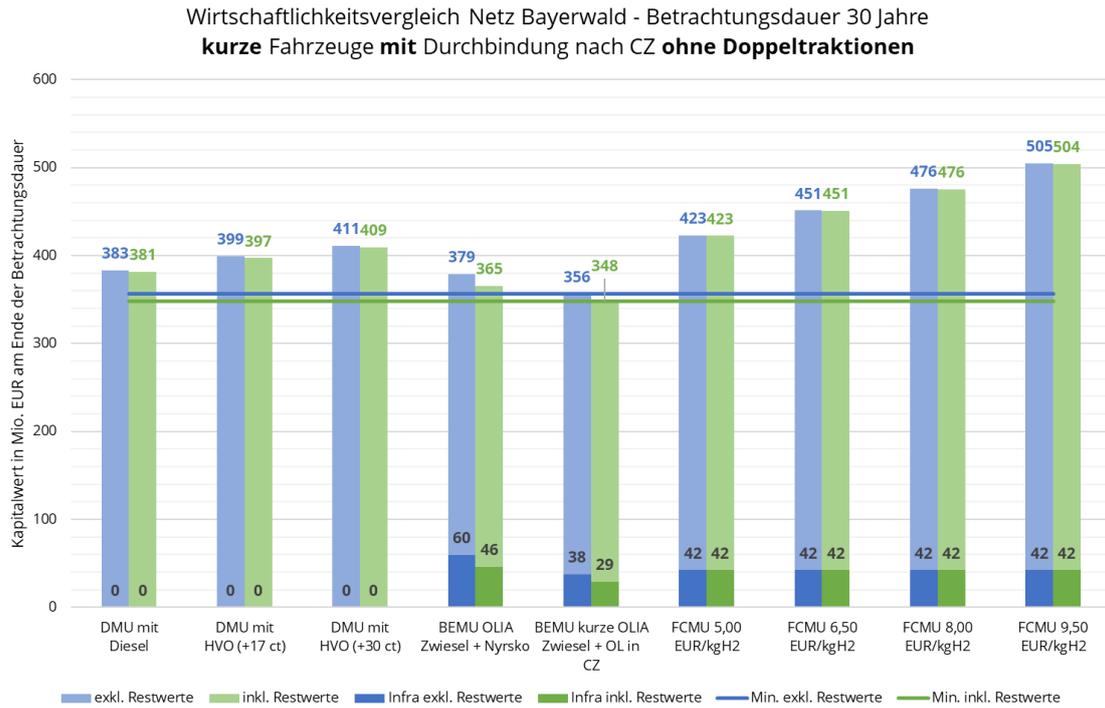


Abbildung 29: Ergebnis Fall 2a neu (mit Durchbindung nach CZ, kurze Fahrzeuge)

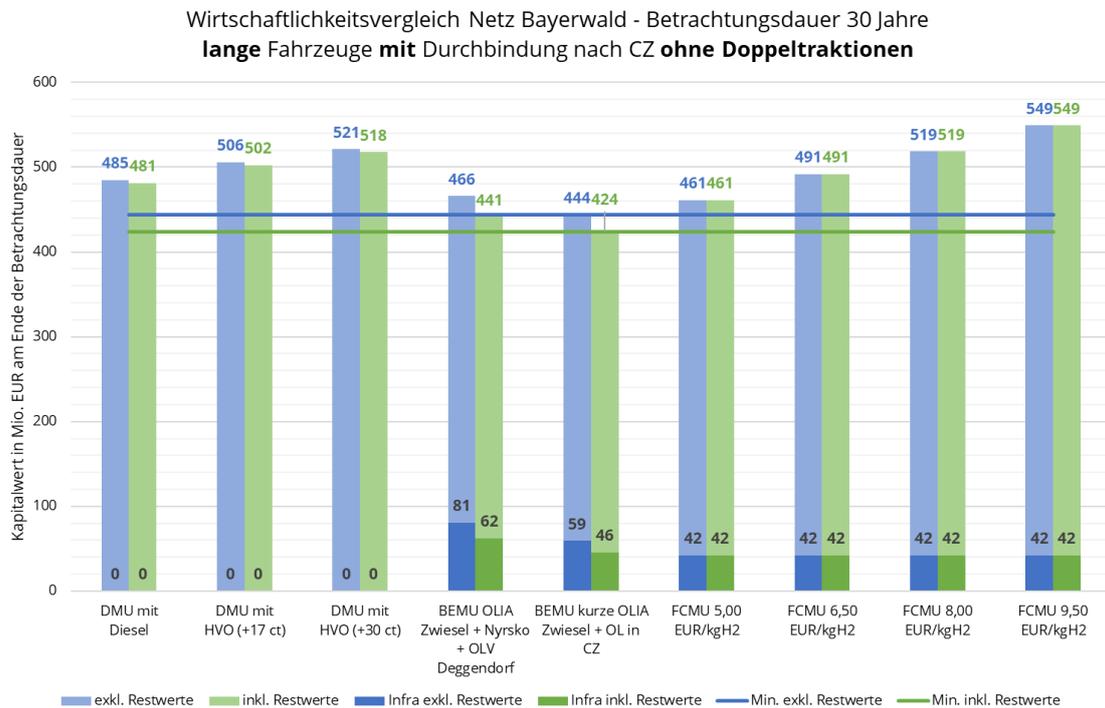


Abbildung 30: Ergebnis Fall 3 neu (mit Durchbindung nach CZ, lange Fahrzeuge)

7 Zusammenfassung

Das Bayerwaldnetz kann mit Oberleitungs-/Batterie-Hybridfahrzeugen (BEMU) und mit Wasserstoff-/Batterie-Hybridfahrzeugen (FCMU) betrieben werden, unabhängig ob es sich um kurze (41 bis 46 m) oder lange (54 bis 57 m Länge) Fahrzeuge handelt. Dies wurde anhand von Fahrzeugdaten von BEMU und FCMU mehrerer Hersteller simulativ überprüft. Die Ergebnisse der Ausgangsstudie, zu durch vorliegende Studie ergänzt wird, konnten bestätigt werden.

Die wirtschaftlichen Untersuchungen ergaben, dass kurze BEMU-Fahrzeuge die wirtschaftlichste alternative Antriebstechnologie im Bayerwaldnetz sind. Der Einsatz von FCMU-Fahrzeugen ist in allen Varianten deutlich kostenintensiver. Für die BEG mbH ist außerdem die Vollelektrifizierung des tschechischen Abschnittes von Klatovy bis Bayerisch Eisenstein von großem wirtschaftlichem Vorteil (ca. 22 Mio. EUR Einsparung im Betrachtungszeitraum), da Infrastrukturinvestitionen im deutschen Streckenabschnitt entfallen können. Die Gutachter empfehlen deshalb als Ergebnis der wirtschaftlichen Betrachtungen den Betrieb mit kurzen BEMU-Fahrzeugen mit 46 bis 47 m Länge und die Unterstützung der Vollelektrifizierung im tschechischen Abschnitt von Klatovy bis Bayerisch Eisenstein.

DMU-Betrieb mit konventionellem Dieselmotorkraftstoff wurde in dieser Studie als Vergleichsbasis mitbetrachtet, in Abstimmung mit dem Auftraggeber gehen die Gutachter jedoch davon aus, dass eine Neubeschaffung von konventionellen DMU und ein weiterer Betrieb mit konventionellem Dieselmotorkraftstoff nach 2034 (voraussichtliche Betriebsaufnahme) politisch und ökologisch nicht vertretbar erscheint. Er würde auch dem Ziel des Freistaats widersprechen, den Dieselmotorkraftstoffbetrieb bis zum Jahr 2040 zu beenden. Wie in der Ausgangsstudie aus dem Jahr 2022 ausgeführt, lassen sich Dieselmotorkraftstoffwagen auch mit sogenannten synthetischen oder biogenen Kraftstoffen betreiben, die teilweise oder vollständig klimaneutral sind. Deshalb wurde in der vorliegenden Studie auch ein Vergleichsszenario mit HVO-100-Kraftstoffen mit unterstellten Mehrkosten ggü. konventionellem Dieselmotorkraftstoff mitbetrachtet. Lässt der Betrieb mit konventionellem Dieselmotorkraftstoff zumindest im Szenario ohne Durchbindung nach Tschechien (weiterhin Brechung RB 35 in Bayerische Eisenstein) noch einen geringen wirtschaftlichen Vorteil des konventionellen Dieselmotorkraftstoffbetriebs erwarten, so zeigen die beiden HVO-100-Szenarien keine wirtschaftlichen Vorteile ggü. einem BEMU-Betrieb.

Kern der für einen BEMU-Betrieb notwendigen Infrastruktur ist eine Oberleitungsinselanlage um den Bahnhof Zwiesel für die Linien RB 35 bis RB 37, wobei die RB 35 unter Oberleitung fahren und laden kann, die Linien RB 36 und RB 37 jeweils im Stand im Bahnhof Zwiesel.

Bei tatsächlich erfolgreicher Umsetzung der geplanten Vollelektrifizierung von Klatovy bis Bayerisch Eisenstein/ Železná Ruda-Alžbětín in Tschechien sind auf den deutschen Streckenabschnitten folgende Infrastrukturmaßnahmen notwendig bzw. werden bei mehreren in der Ausgangsstudie untersuchten Varianten als Vorzugslösung durch die Gutachter empfohlen:

- RB 35:
 - Oberleitungsinselanlage (OLIA) Zwiesel (Bettmannsäge – Zwiesel)
 - Ladung in:
 - Plattling (15 kV, 16,7 Hz),
 - Bayerisch Eisenstein und
 - bei Durchbindung nach Klatovy während der Fahrt (25 kV, 50 Hz),
- RB 36: Errichtung einer Ladestation in Grafenau,
- RB 37: Mitnutzung der OLIA Zwiesel zur Standladung in Zwiesel,
- RB 38: Errichtung einer Ladestation in Viechtach.

Würde die Vollelektrifizierung im tschechischen Abschnitt nicht umgesetzt sind die in der Ausgangsstudie empfohlenen Infrastrukturmaßnahmen umzusetzen, die im Folgenden der Übersichtlichkeit halber nochmals aufgeführt sind:

Bei einem Linienendpunkt der RB 35 in Bayerisch Eisenstein, Fälle 1 und 1a der Ausgangsstudie:

- Ausbau der OLIA Zwiesel auf den Abschnitt Bettmannsäge – Ludwigsthal
- Zusätzlich bei grenzüberschreitender Durchbindung bis Klatovy in Tschechien, Fälle 2, 2a und 3 der Ausgangsstudie:
- RB 35: OLIA Nyrsko (Dešenice – Petrovice n. Úhlavou) in Tschechien,
- RB 35: Fahrleitungsverlängerung Plattling – Deggendorf Hbf.

Beide Infrastrukturausführungen (mit und ohne Vollelektrifizierung in CZ) ermöglichen den Verkehr mit den untersuchten BEMU-Typen, insbesondere mit der zu bevorzugenden Länge von 46 m (bspw. Siemens Mireo Plus B, Stadler Flirt Akku SH). Die Prüfung der Fahrplan- und Umlaufkonzepte zeigte außerdem, dass auch der geforderte Fahrplan, der dem heutigen Betriebskonzept mit Stadler/ADtranz RegioShuttle RS1 entspricht, auch im Störfall gefahren werden kann. Dies wäre gemäß den Ergebnissen dieser Untersuchung auch mit FCMU-Fahrzeugen problemlos möglich. Die Energieversorgung der Ladeinfrastruktur und der Wasserstoffherzeugungsanlagen kann, wie die vorherige Ausgangsstudie gezeigt hat, durch den lokalen Betreiber des 50-Hz-Energieversorgungsnetzes Bayernwerk bereitgestellt werden.

Für die oben benannten Infrastrukturmaßnahmen und bei umgesetzter Vollelektrifizierung im tschechischen Abschnitt sind für den BEMU-Betrieb Infrastruktur-Investitionen in Höhe von ca. 26,5 Mio. EUR erforderlich. Enthalten ist hierin auch ein Anteil für die Elektrifizierung des deutschen Teils des Bahnhofs Bayerisch Eisenstein. Bei der Berechnung der der Infrastrukturkosten wurden 20 % Planungskosten, bezogen auf das Investitionsvolumen, unterstellt. Darin enthalten sind für alle Infrastrukturmaßnahmen unterstellte Planfeststellungsverfahren, da nahezu das gesamte Bayerwaldnetz bis auf die Randbereiche bei Klatovy und Plattling in naturschutzrechtlich teilweise streng geschützten

Bereichen liegt. Eine Umweltverträglichkeitsprüfung und damit ein Planfeststellungsverfahren mit entsprechendem zeitlichem und finanziellem Aufwand sind deshalb bei allen Maßnahmen mit hoher Wahrscheinlichkeit zu unterstellen.

Die notwendige Fahrzeuganzahl beträgt 15 Fahrzeuge inklusive Reserve bei einem unterstellten 1-h-Takt in Einfachtraktion auf den Linien RB 36 bis RB 38 und dem teilweisen Einsatz von Doppeltraktionen auf der RB 35 entsprechend des heute mit den RegioShuttle-Fahrzeugen umgesetzten Bespannungsregimes ohne Durchbindung nach Klatovy. Für eine Durchbindung nach Klatovy im 2-h-Takt in Einfachtraktion sind 19 Fahrzeuge inkl. Reserve erforderlich. Wenn möglich ist eine Optimierung der Kapazitäten der Fahrten auf der RB 35 und der Umlaufpläne vorzunehmen, sodass durchgehend mit Einfach- statt Doppeltraktionen (17 statt 19 Fahrzeuge, siehe Fälle 1a neu und 2a neu) verkehrt werden kann. Möglich wird dies ggf. durch die deutlich höheren Kapazitäten eines zweiteiligen Fahrzeugs mit einer Länge von ca. 46 bis 47 m (z. B. Flirt Akku SH, Mireo Plus B und Plus H), das ca. 120 Sitzplätze aufweist im Vergleich mit RegioShuttle-Fahrzeugen, die in Doppeltraktion ca. 150 Sitzplätze bieten.

Nicht betrachtet wurde der Ausbau auf die Streckenklasse C2 als Voraussetzung für den Betrieb mit allen marktgängigen BEMU sowie FCMU. Nur der iLint der Firma Alstom hielt auch die Streckenklasse B2 ein. Die Umsetzung einer Streckenklassenanhebung ist somit vor Inbetriebnahme neuer Fahrzeuge zwingend erforderlich, da auch zum Ersatz der Bestandsflotte potenziell mögliche FCMU und DMU-Neufahrzeuge nach aktuellem Stand mindestens eine Anhebung auf Streckenklasse B2 benötigen, alle potentiellen Fahrzeuge auf dem Markt für einen BEMU-Verkehr erfordern sogar mindestens die Anhebung auf C2. Insbesondere vor dem Hintergrund des Alters der RegioShuttle-Bestandsflotte, das voraussichtlich einen ggf. notwendigen Weiterbetrieb für nur einige wenige Jahre möglich machen würde, ist hier vor allem schneller Handlungsbedarf zur Streckenklassenanhebung technologieunabhängig notwendig. Die Gutachter empfehlen deshalb eine Anhebung auf Streckenklasse C2, zumal nach Auskunft der BEG die DB Netz AG die drei neu zu errichtenden Brücken im Bayerwaldnetz bereits für die Streckenklasse C2 auslegt. Es ergibt sich ansonsten ggf. nach Ablauf der technischen Nutzungsdauer der RegioShuttle-Fahrzeuge ein Fahrzeugmangel und in Folge die Notwendigkeit der Einstellung des Verkehrs im Netz Bayerwald. Die DB Netz AG hat daher mit Förderung des Freistaats Bayern bereits eine Machbarkeitsuntersuchung zur Erhöhung der Achslast auf den Streckenabschnitten Gotteszell – Bayerisch Eisenstein und Zwiesel – Grafenau gestartet, die derzeit keine Streckenklasse C2 aufweisen.

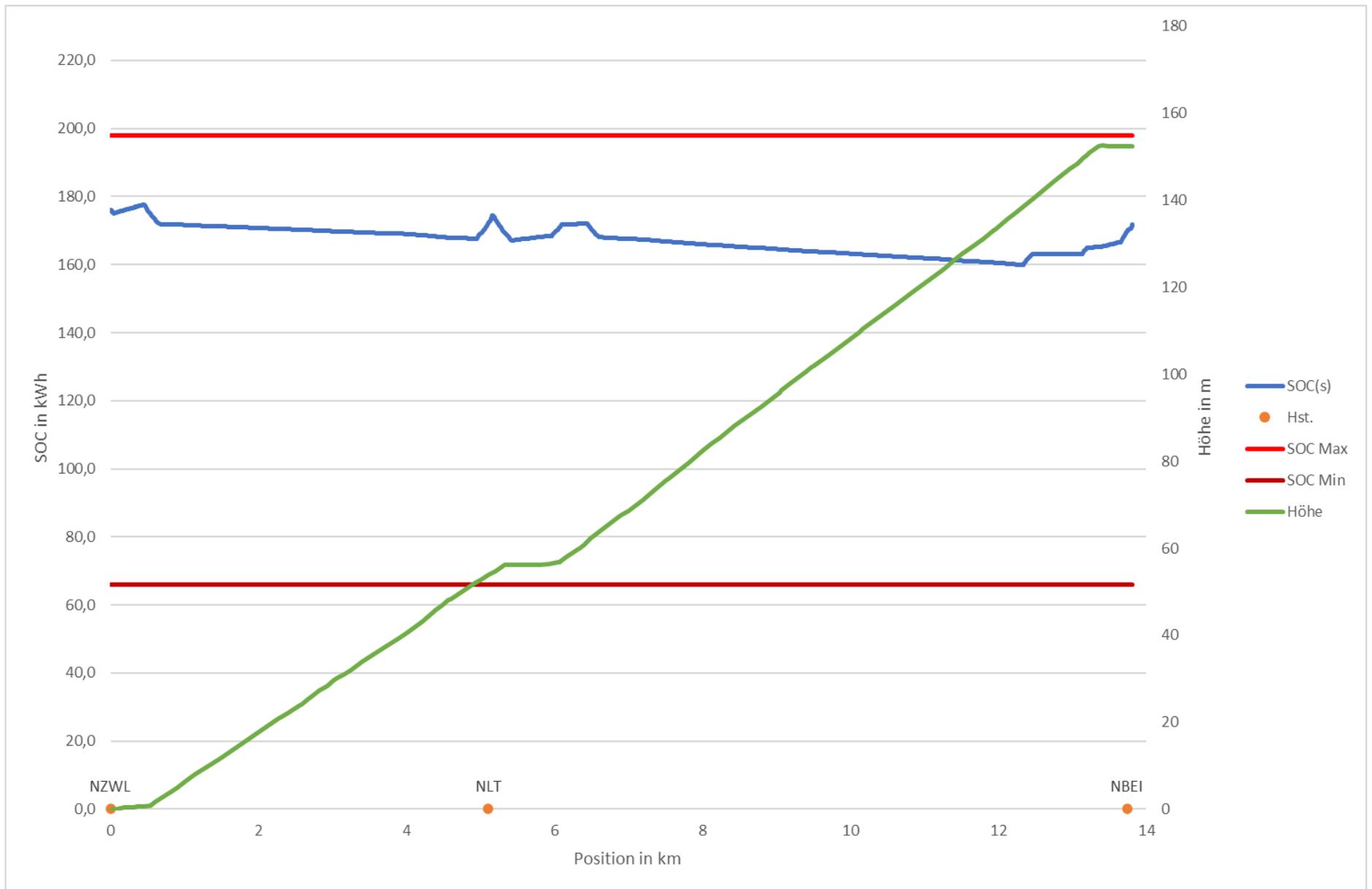
Die Bestimmungen zum Traktionsartenwechsel auf der freien Strecke bzw. an Haltepunkten gemäß der aktuell gültigen DB-Richtlinien 408.0493 (für Fahrdienstleiter) bzw. 408.2493 (für Triebfahrzeugführer) waren zum Zeitpunkt des Ergänzungsgutachtens noch nicht endgültig geklärt, siehe Hauptgutachten *2022-12-19 BEG Bayerwald Bericht_2022-618350-659.0_fin*.

<<Ende des Berichtsteils>>

Anlagen



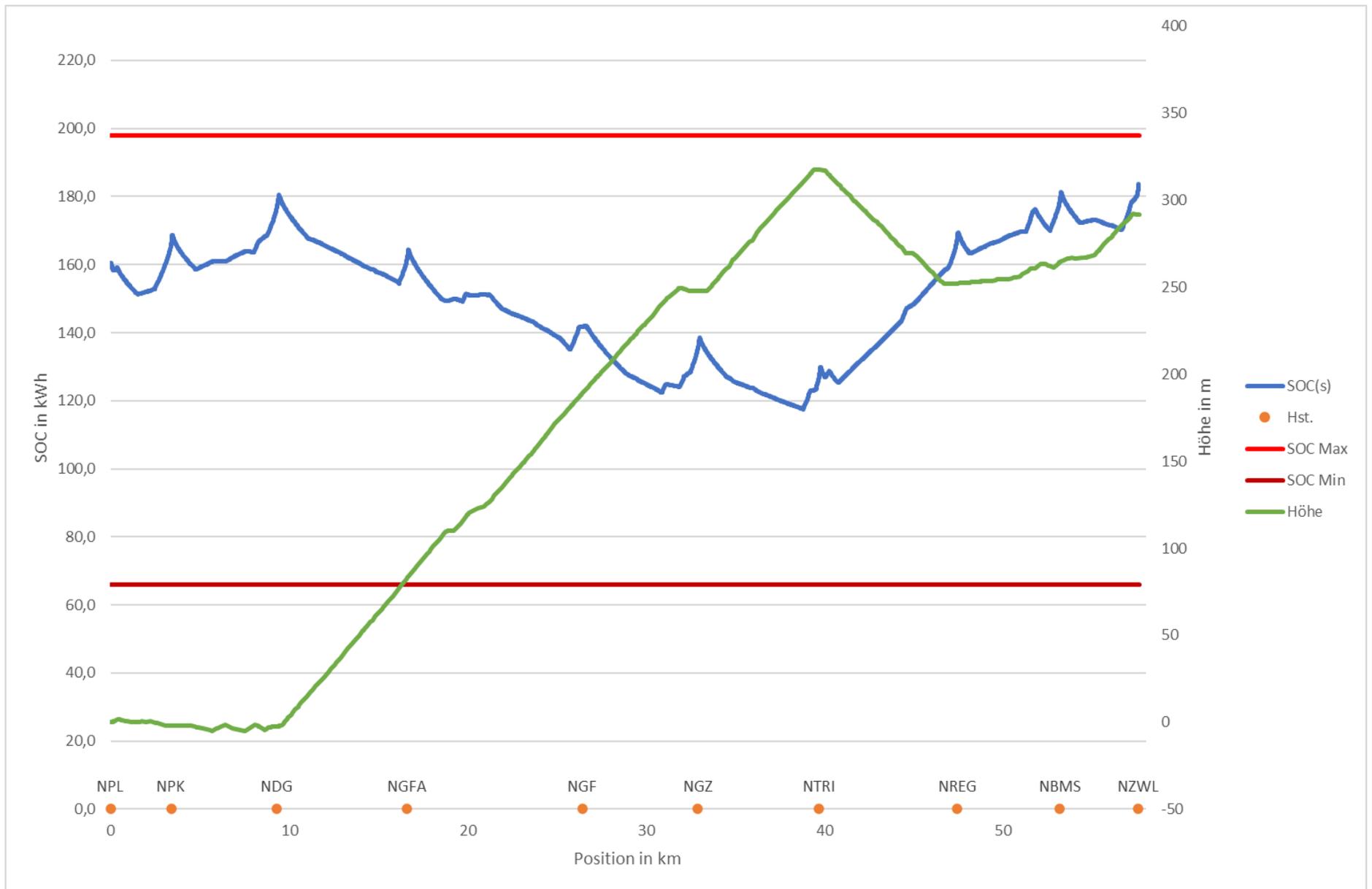
Anlage 1: SOC-Verlauf der Dynamikbatterie, kurzer FCMU, RB 35 Plattling – Zwiessel



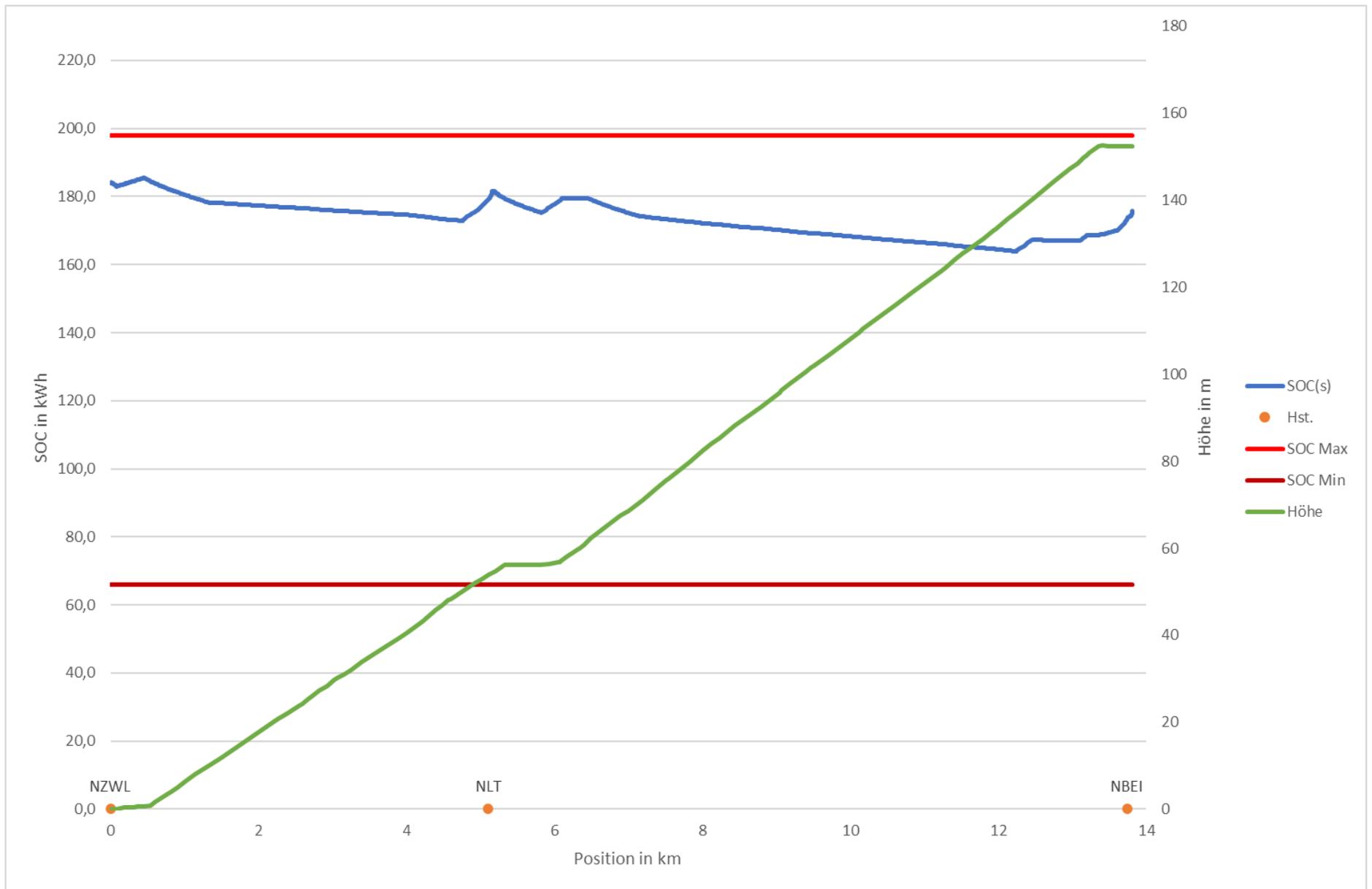
Anlage 2: SOC-Verlauf der Dynamikbatterie, kurzer FCMU, RB 35 Zwiesel – Bayerisch Eisenstein



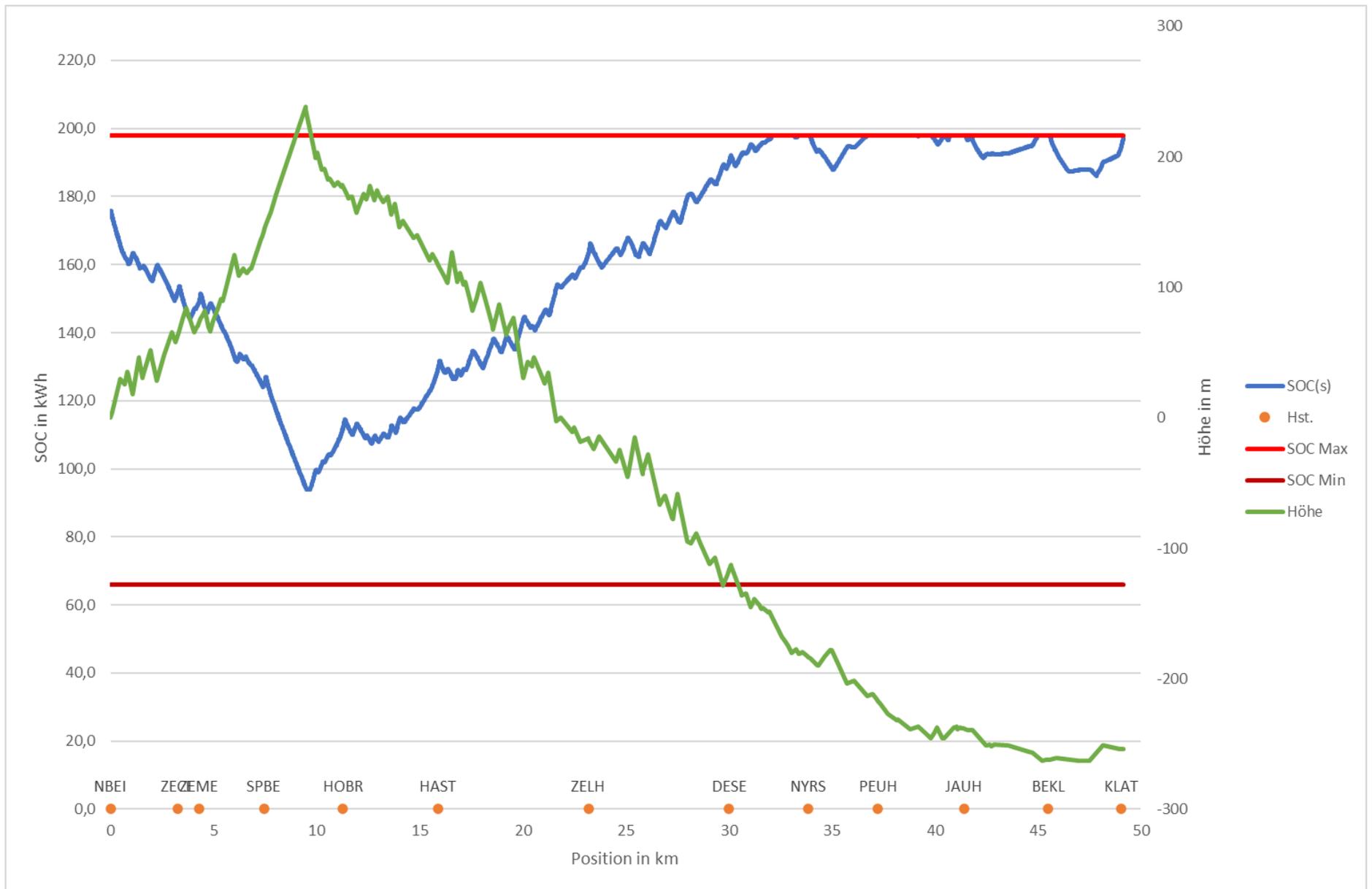
Anlage 3: SOC-Verlauf der Dynamikbatterie, kurzer FCMU, RB 35 Bayerisch Eisenstein – Klatovy



Anlage 4: SOC-Verlauf der Dynamikbatterie, langer FCMU, RB 35 Plattling – Zwiesel



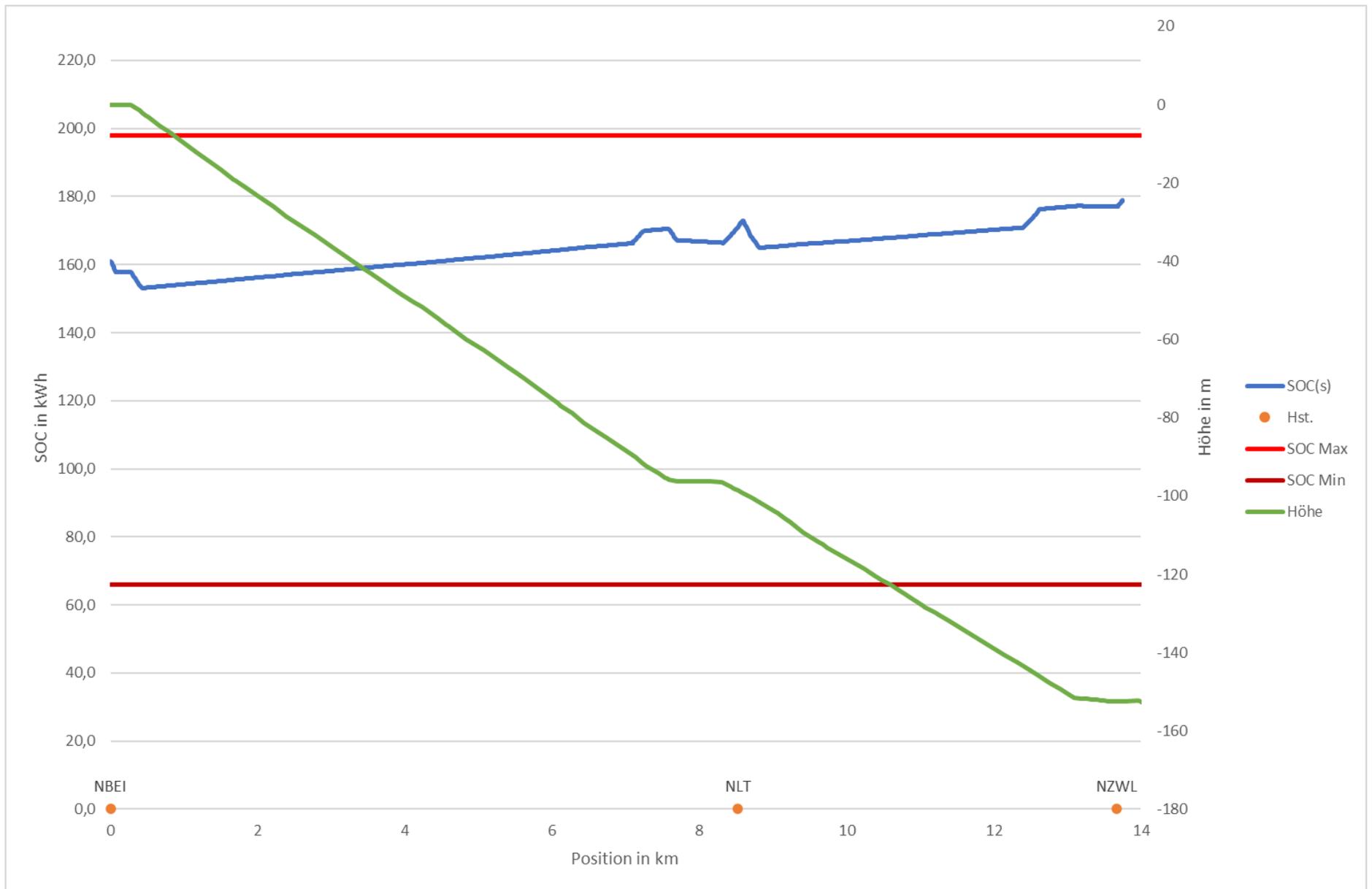
Anlage 5: SOC-Verlauf der Dynamikbatterie, langer FCMU, RB 35 Zwiesel – Bayerisch Eisenstein



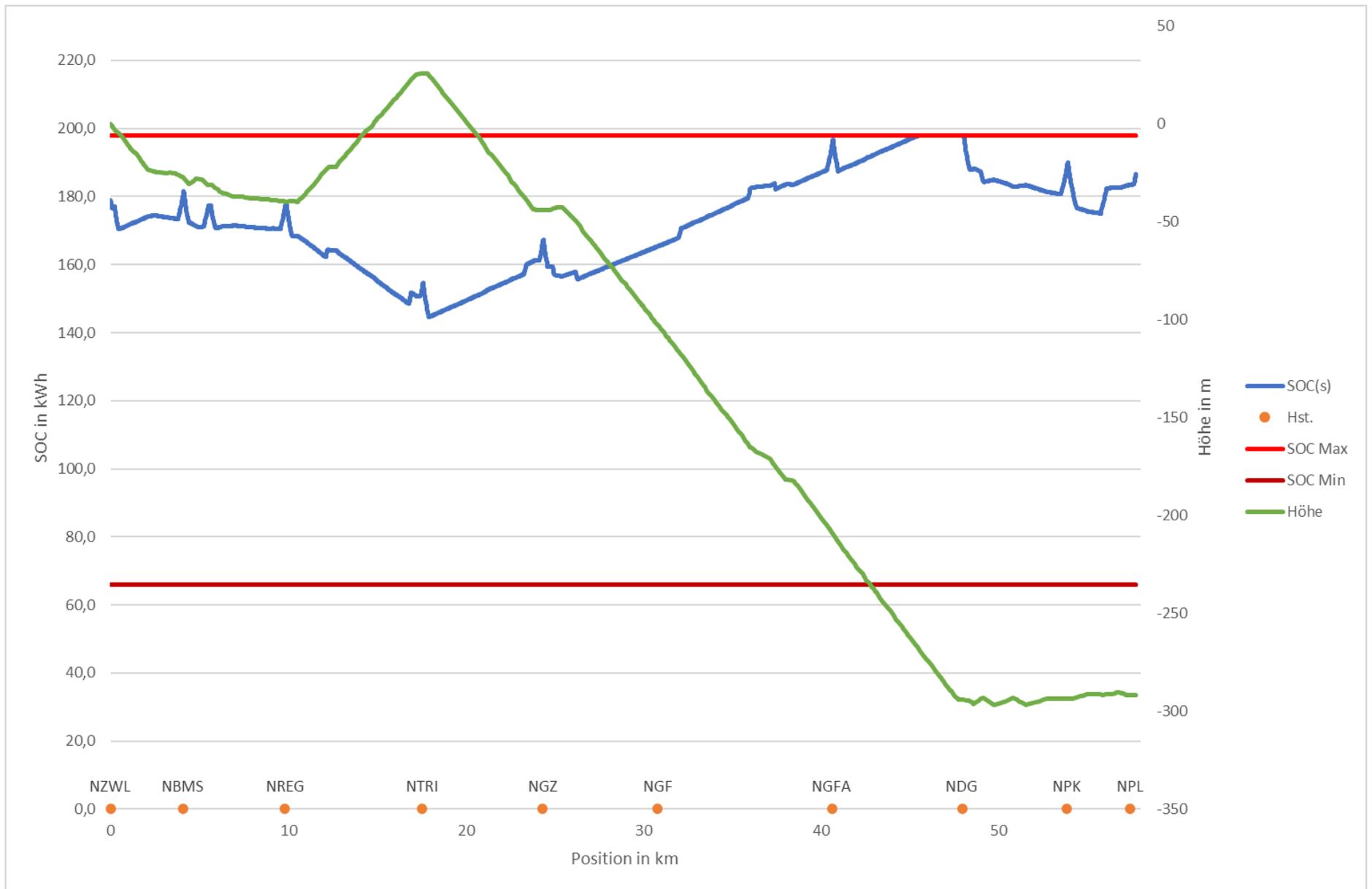
Anlage 6: SOC-Verlauf der Dynamikbatterie, langer FCMU, RB 35 Bayerisch Eisenstein – Klatovy



Anlage 7: SOC-Verlauf der Dynamikbatterie, kurzer FCMU, RB 35 Klatovy – Bayerisch Eisenstein



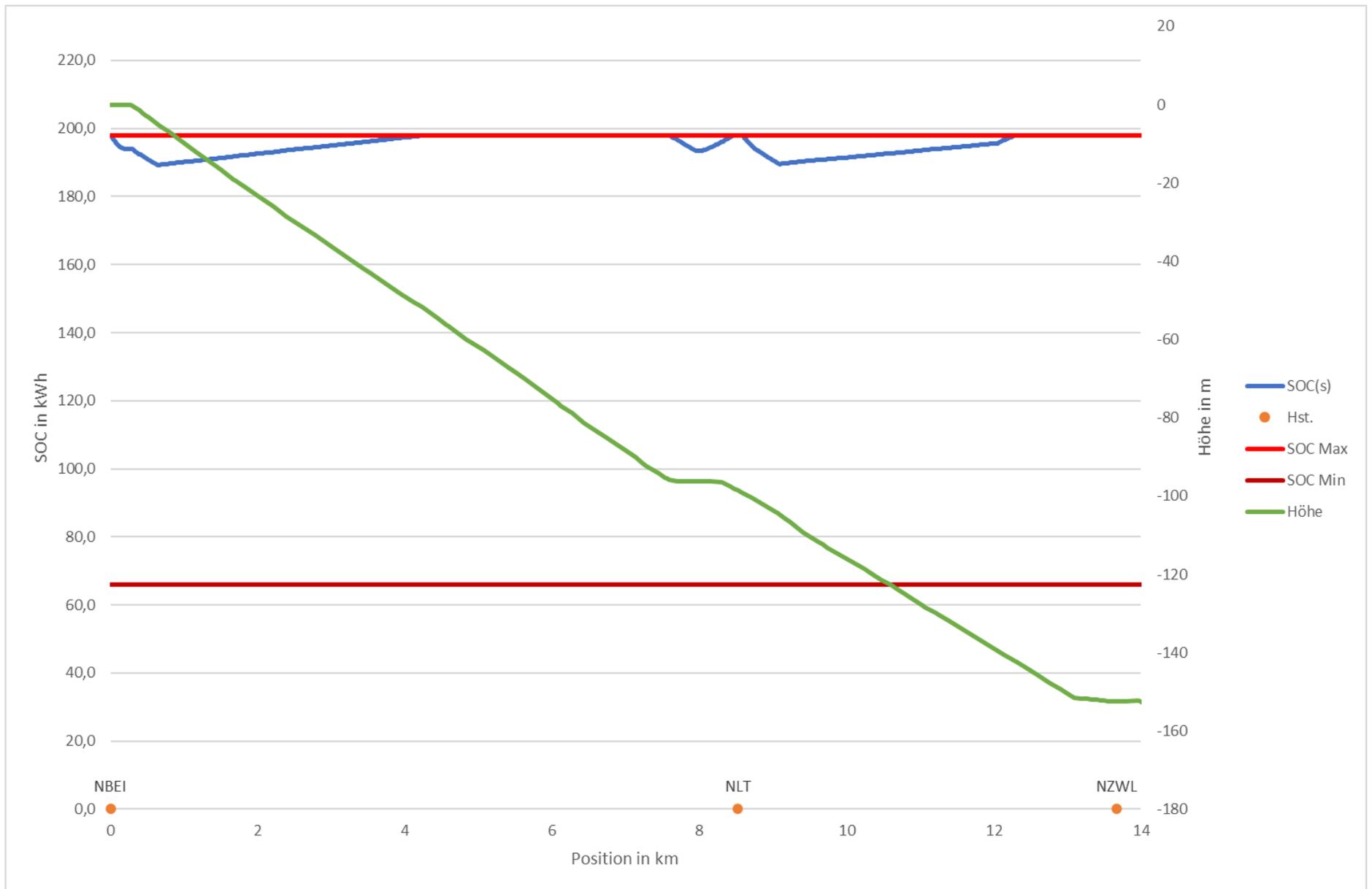
Anlage 8: SOC-Verlauf der Dynamikbatterie, kurzer FCMU, RB 35 Bayerische Eisenstein – Zwiesel



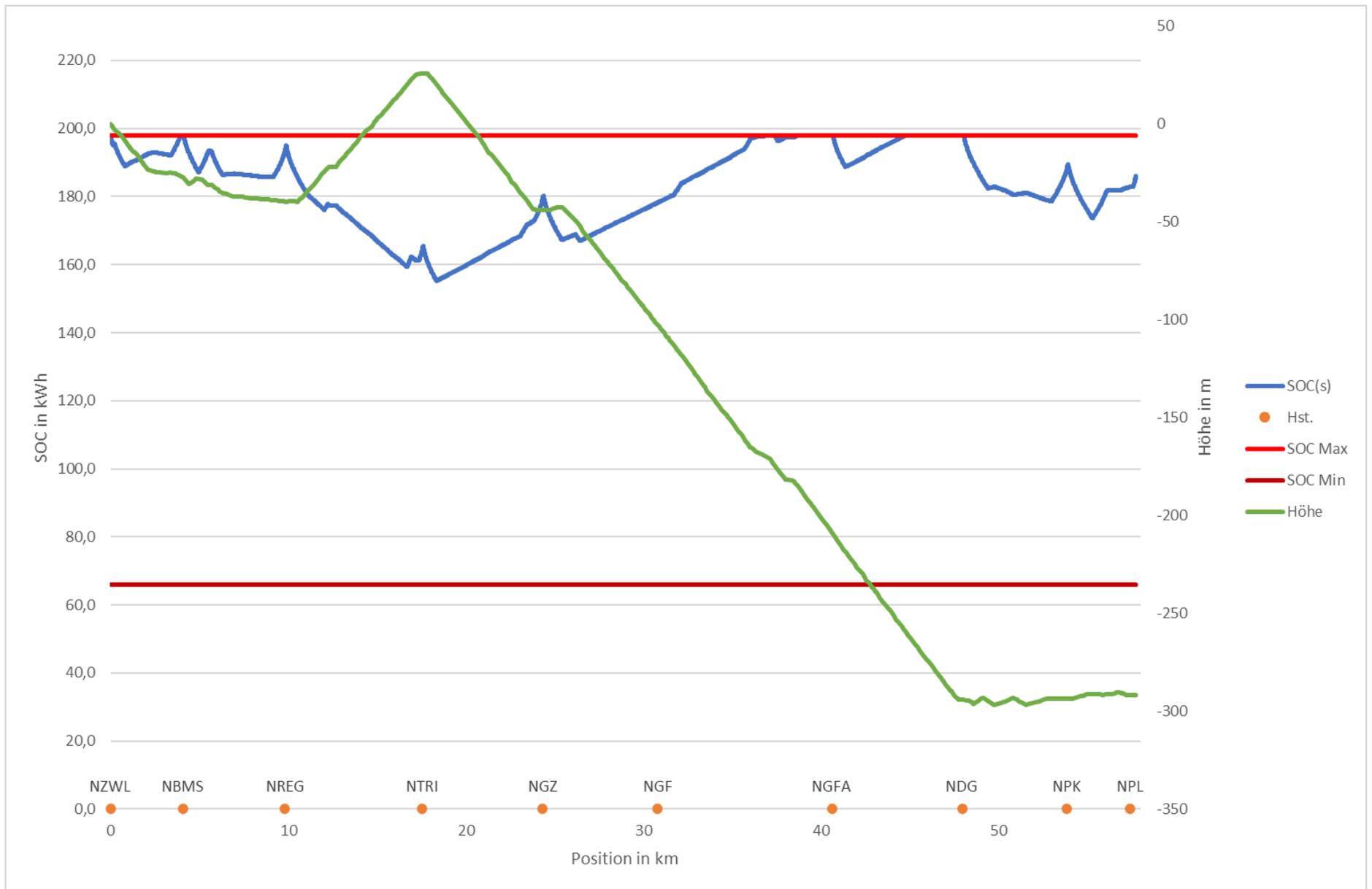
Anlage 9: SOC-Verlauf der Dynamikbatterie, kurzer FCMU, RB 35 Zwiesel – Plattling



Anlage 10: SOC-Verlauf der Dynamikbatterie, langer FCMU, RB 35 Klatovy – Bayerisch Eisenstein



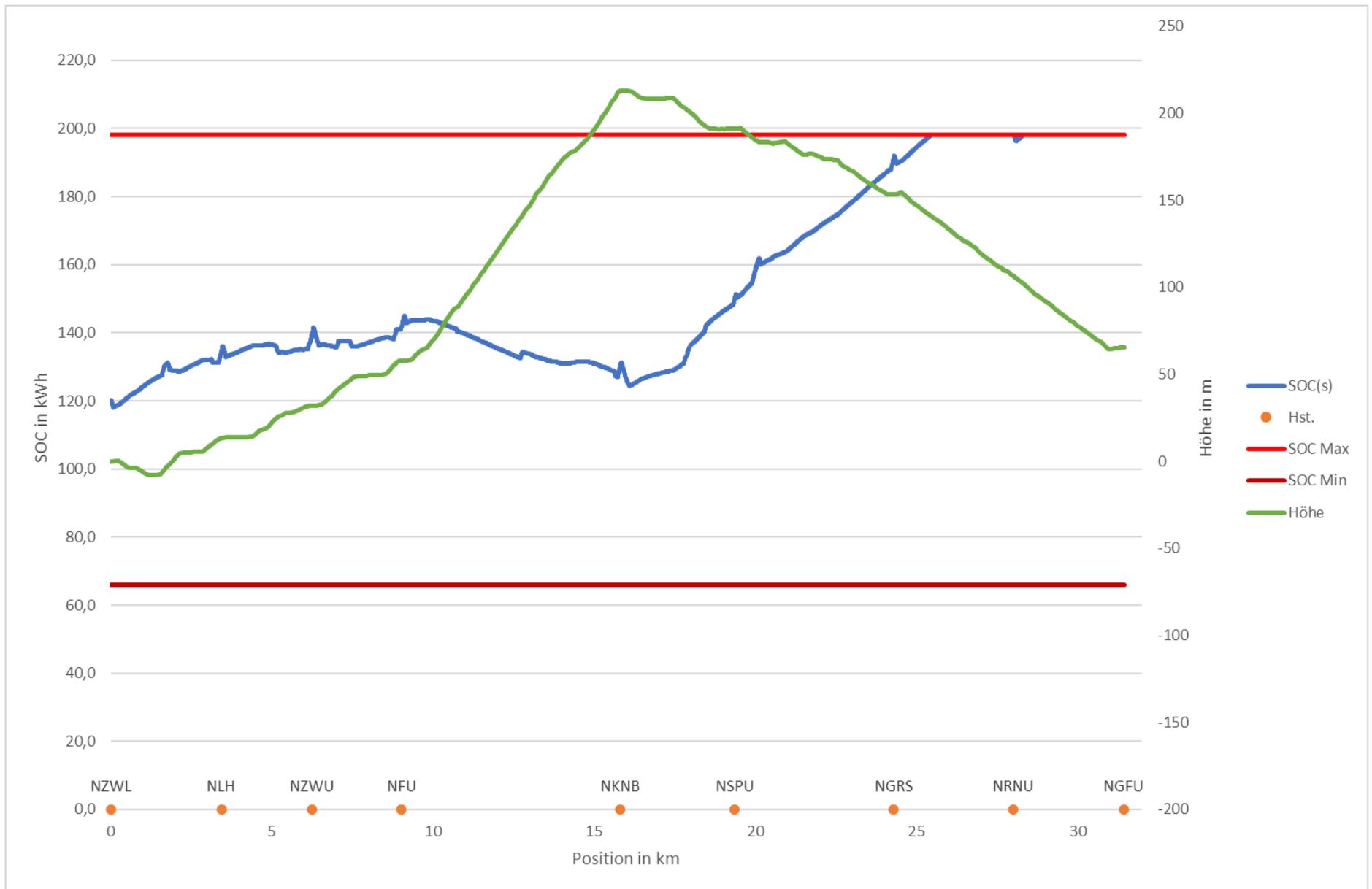
Anlage 11: SOC-Verlauf der Dynamikbatterie, langer FCMU, RB 35 Bayerisch Eisenstein – Zwiesel



Anlage 12: SOC-Verlauf der Dynamikbatterie, langer FCMU, RB 35 Zwiesel – Bayerisch Eisenstein



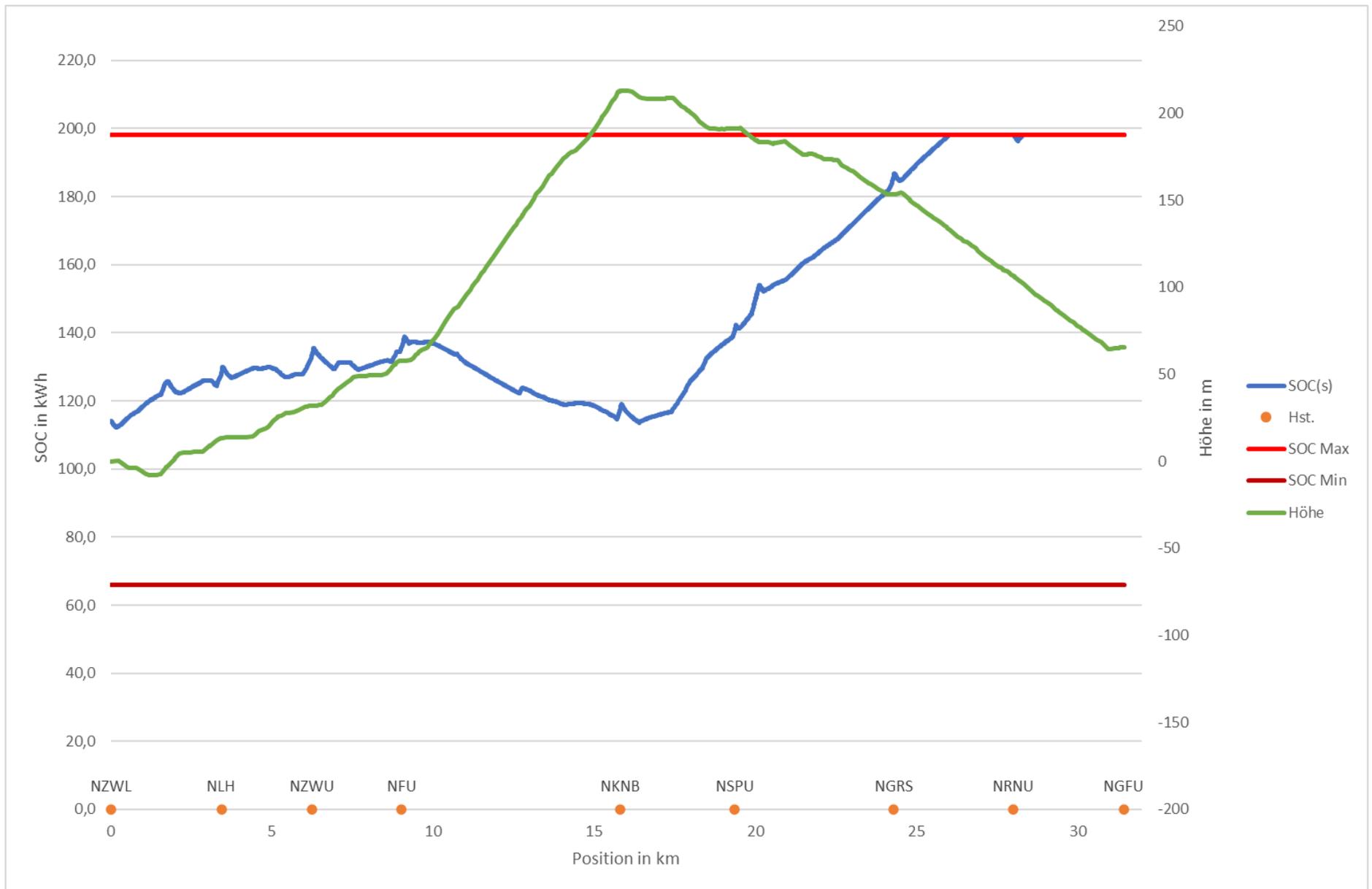
Anlage 13: SOC-Verlauf der Dynamikbatterie, kurzer FCMU, RB 36 Grafenau – Zwiesel



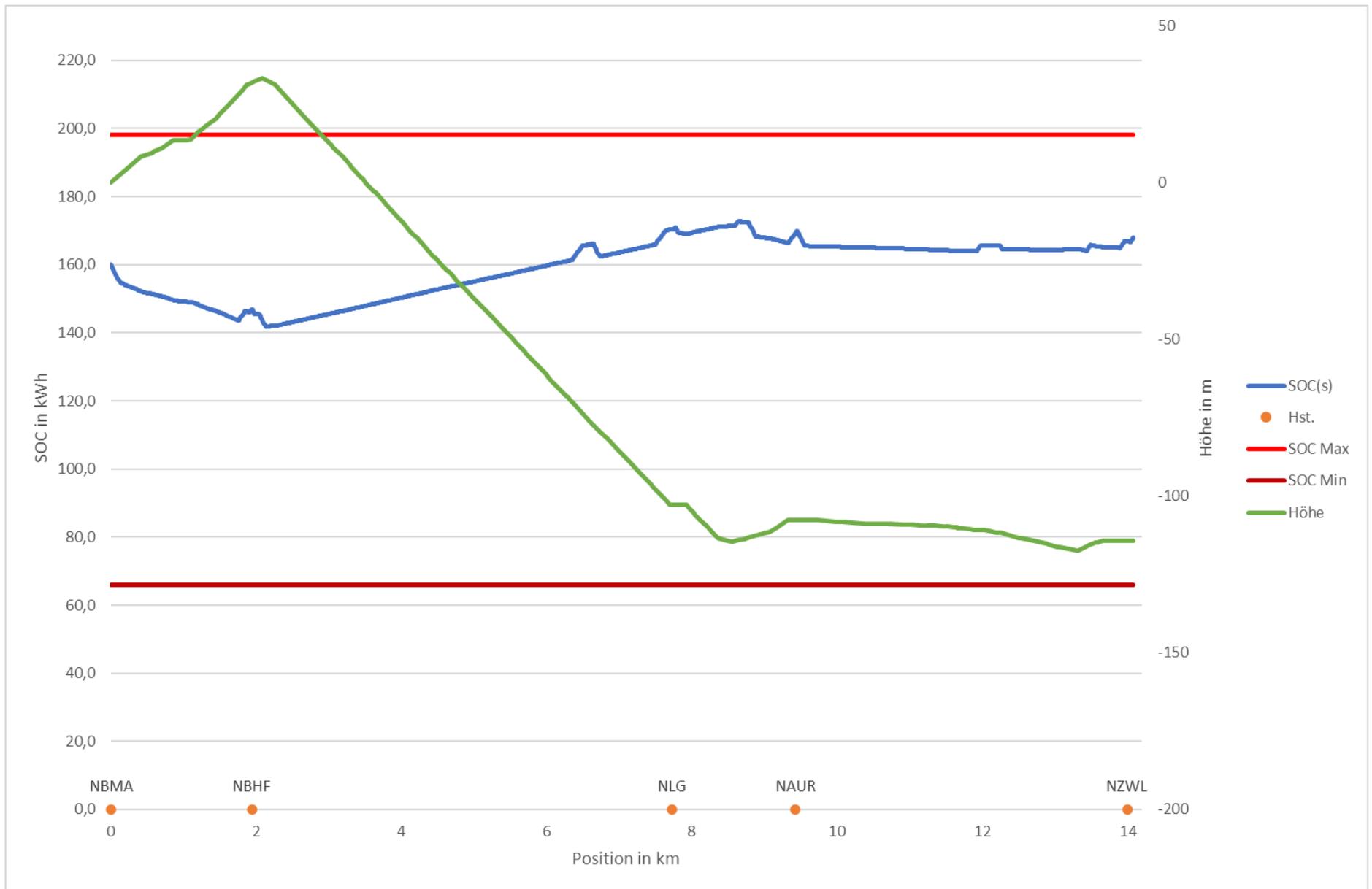
Anlage 14: SOC-Verlauf der Dynamikbatterie, kurzer FCMU, RB 36 Zwiesel – Grafenau



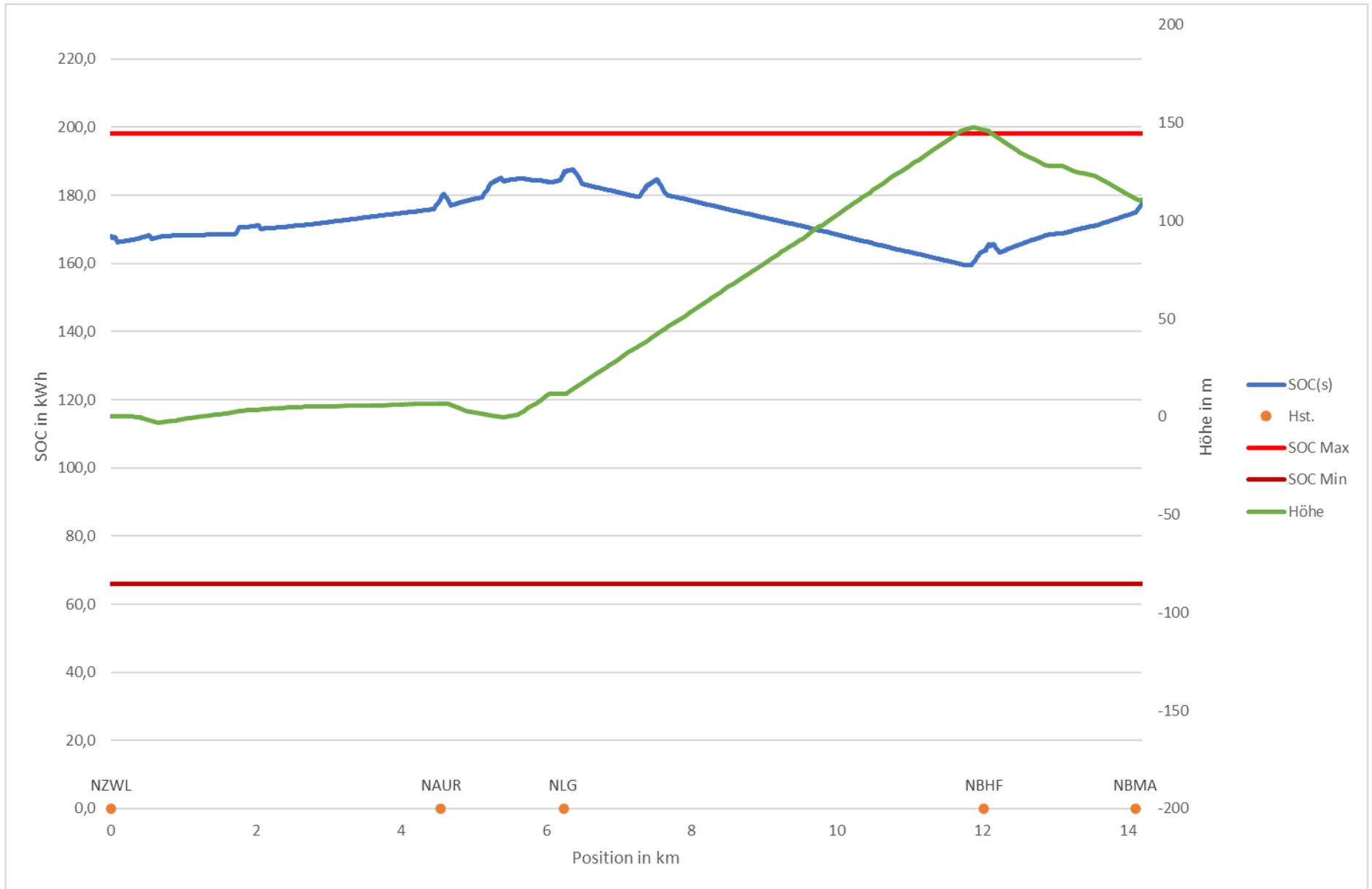
Anlage 15: SOC-Verlauf der Dynamikbatterie, langer FCMU, RB 36 Grafenau – Zwiesel



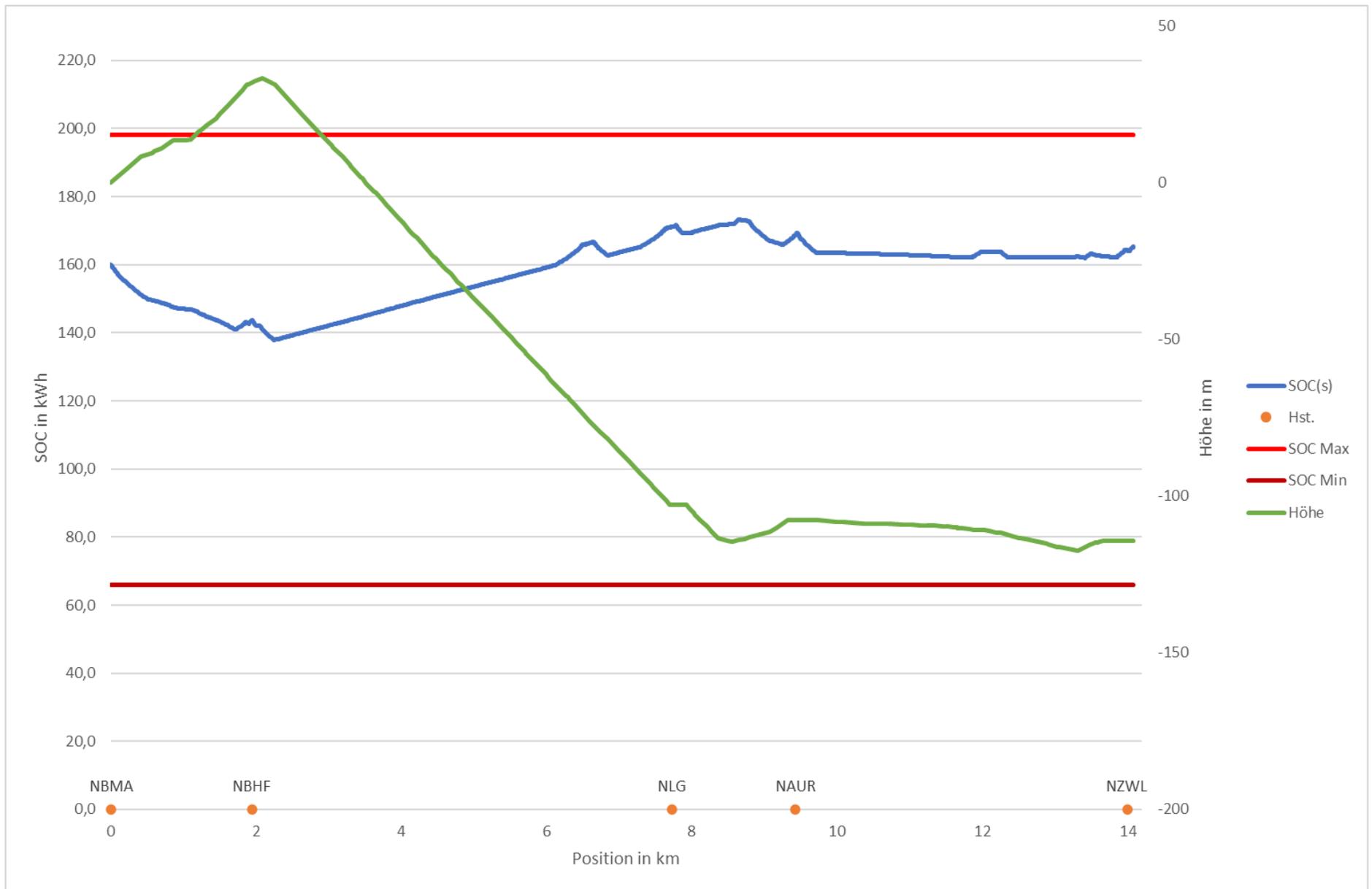
Anlage 16: SOC-Verlauf der Dynamikbatterie, langer FCMU, RB 36 Zwiesel – Grafenau



Anlage 17: SOC-Verlauf der Dynamikbatterie, kurzer FCMU, RB 37 Bodenmais – Zwiesel



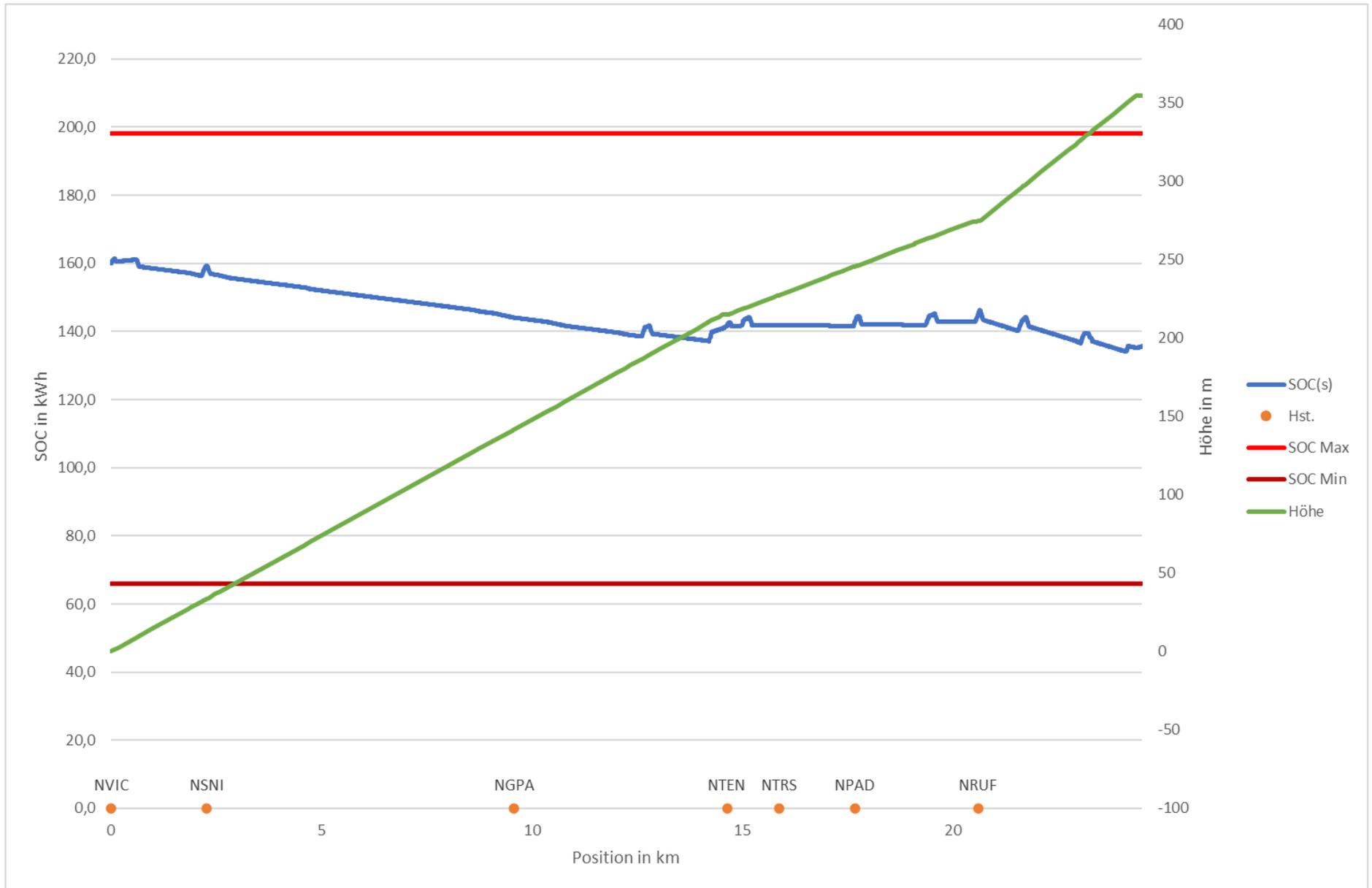
Anlage 18: SOC-Verlauf der Dynamikbatterie, kurzer FCMU, RB 37 Zwiesel – Bodenmais



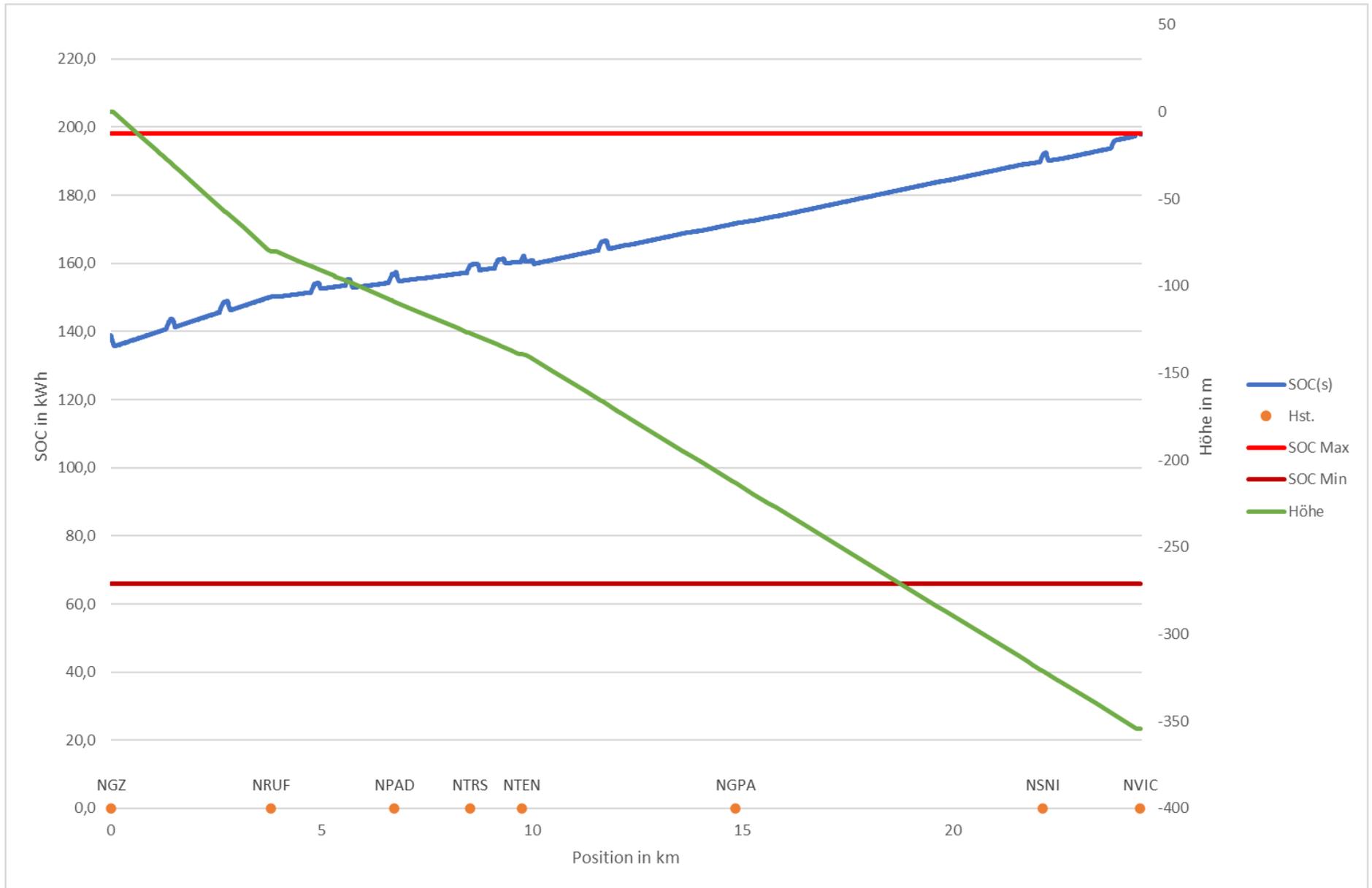
Anlage 19: SOC-Verlauf der Dynamikbatterie, langer FCMU, RB 37 Bodenmais – Zwiesel



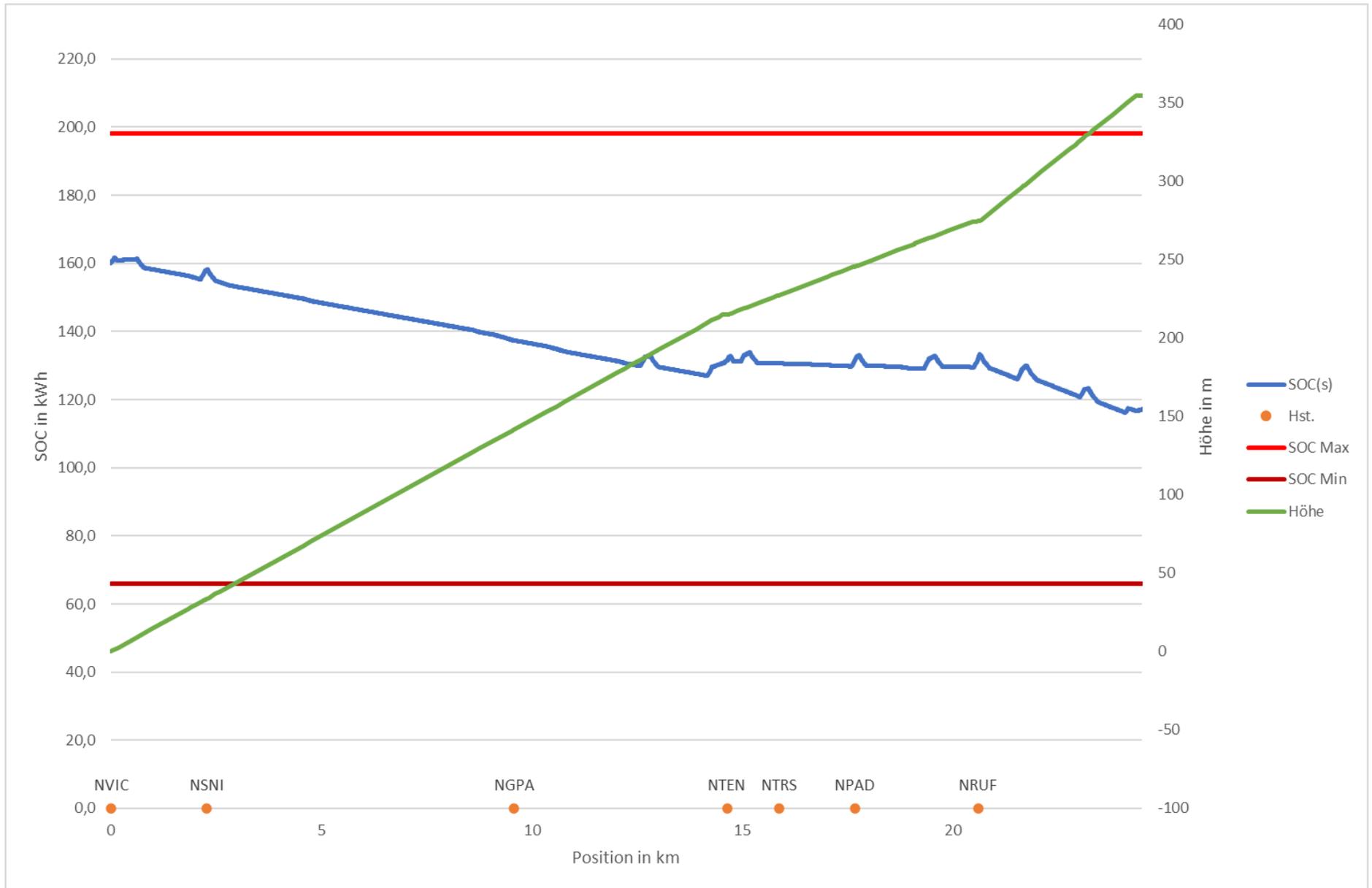
Anlage 20: SOC-Verlauf der Dynamikbatterie, langer FCMU, RB 37 Zwiesel – Bodenmais



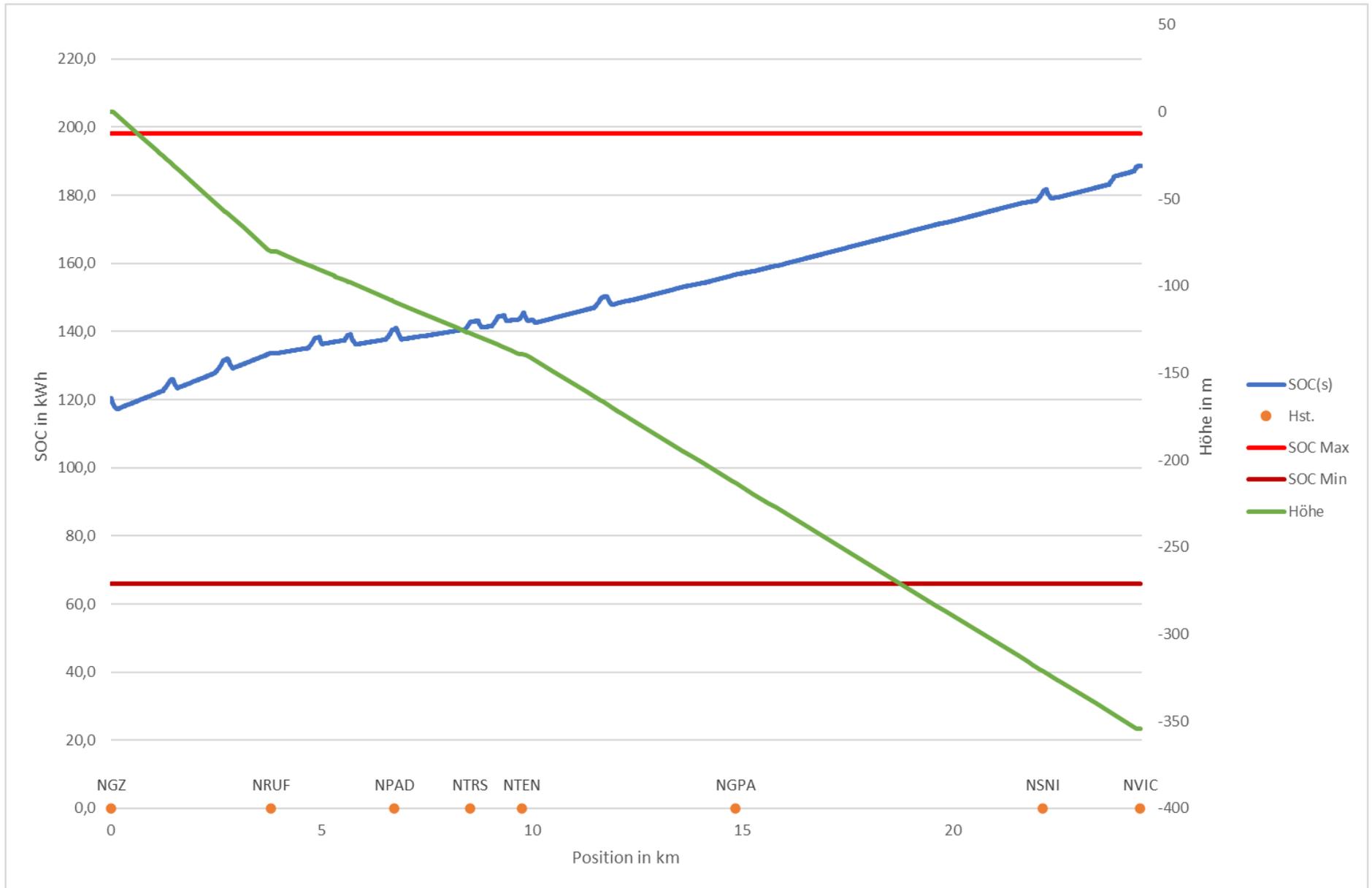
Anlage 21: SOC-Verlauf der Dynamikbatterie, kurzer FCMU, RB 38 Viechtach – Gotteszell



Anlage 22: SOC-Verlauf der Dynamikbatterie, kurzer FCMU, RB 38 Gotteszell – Viechtach



Anlage 23: SOC-Verlauf der Dynamikbatterie, langer FCMU, RB 38 Viechtach – Gotteszell



Anlage 24: SOC-Verlauf der Dynamikbatterie, langer FCMU, RB 38 Gotteszell – Viechtach

Anlage 25: Fahrzeugbezogene Kosten kurze Fahrzeuge

*Preisstand ermittelt am Jahres-Beginn 2023	Diesel- triebzug (DMU)	Oberleit.-/ Batterie- Hybrid (BEMU)	Wasserstoff-/ Batterie- Hybrid (FCMU)
Referenzfahrzeug	kurzer DMU	kurzer BEMU	kurzer FCMU
Länge Fahrzeug [m]	ca. 42 m	Ca. 47 m	ca. 47 m
Sitzplätze (können netzspezifisch abweichen)	125	120	120
Fahrzeugmasse leer [t]	78	93	90
Speichergröße [kWh]	-	Projektspez. 550	Projektspez. 220
Anzahl PowerPacks/ BSZ pro Fahrzeug	2 (je 390 kW)	-	2 (je 200 kW)
*Fahrzeugbeschaffung [Mio. €]	4,80	6,92	8,50
*Tausch Batterie [Tsd. €] (1.200 €/kWh LTO)	-	660 (LTO)	264 (LTO)
*Revision der PowerPacks/ BSZ [Tsd. €]	197,1 (je PP 98,54)	-	160 (400/kW)
*regelmäßige HU (nach 8 Jahren) [Tsd. €]	307	304	342 (inkl. Drucksystem)
*Betriebsnahe Instandhaltung je Fzg. [€/km]	0,855	0,621	0,699
Lebensdauer [a] / Abschreibungsdauer [a]	30 / 20	35 / 20	35 / 20
Lebensdauer Energiespeicher (je nach Linie) [a]	-	11 – 15 (im Schnitt 12)	15
Lebensdauer PowerPack/ BSZ [Motor/Fahrzeug-h]	14.400 h	-	24.000 h

Anlage 26: Fahrzeugbezogene Kosten lange Fahrzeuge

*Preisstand ermittelt am Jahres-Beginn 2023	Diesel- triebzug (DMU)	Oberleit.-/ Batterie- Hybrid (BEMU)	Wasserstoff-/ Batterie- Hybrid (FCMU)
Referenzfahrzeug	langer DMU	langer BEMU	langer FCMU
Länge Fahrzeug [m]	ca. 55 m	ca. 57 m	ca. 55 m
Sitzplätze (können netzspezifisch abweichen)	ca. 150 – 160	ca. 150 – 160	ca. 150 – 160
Fahrzeugmasse leer [t]	ca. 100	ca. 131	ca. 106
Speichergröße [kWh]	-	Projektspez. 840	Projektspez. 222
Anzahl PowerPacks/ BSZ pro Fahrzeug	3 (je 390 kW)	-	2 (je 200 kW)
*Fahrzeugbeschaffung [Mio. €]	6,15	7,79	9,25
*Tausch Batterie [Tsd. €] (650 €/kWh NMC)	-	663,7 (NMC)	167,5 (NMC)
*Revision der PowerPacks/ BSZ [Tsd. €]	295,62 (je PP 98,54)	-	160 (400/kW)
*regelmäßige HU (nach 8 Jahren) [Tsd. €]	368	342	375 (inkl. Drucksystem)
*Betriebsnahe Instandhaltung je Fzg. [€/km]	0,963	0,699	0,766
Lebensdauer [a] / Abschreibungsdauer [a]	30 / 20	35 / 20	35 / 20
Lebensdauer Energiespeicher (je nach Linie) [a]	-	6 – 8 (im Schnitt 7)	10
Lebensdauer PowerPack/ BSZ [Motor/Fahrzeug-h]	14.400 h	-	15.000 h

Anlage 27: RB 35/36/37 Oberleitungsinselanlage Zwiesel (Bettmannsäge – Zwiesel)

Oberleitungsinselanlage Zwiesel verkürzt auf den Abschnitt Bettmannsäge – Zwiesel	Anzahl	Kosten	Kosten [€]
Investitionskosten gesamt			18.087.864
Instandhaltungskosten pro Jahr	0,5 %		90.439
Streckengleis Bettmannsäge – Zwiesel - Ludwigsthal (eingleisig Typ Re100)	5.1 km	411.416 €/km	2.098.221
zusätzliche zu elektrifizierende Bahnhofsgleise (nahezu alle Gleise Zwiesel)	5,2 km	610.541 €/km	3.174.814
Weichenbespannungen (alle im Bahnhof Zwiesel)	10	53,665 €/Weiche	536.648
Spezialausführung Masten (Oberleitungs-Feldlängen auf Regenbrücke vor Zwiesel)	3	64,398 €/Feld	193.193
Umbau Bahnsteigdächer zur Freihaltung des freien Stromabnehmerdurchgangs	2	53.665	107.330
Summe Oberleitungsanlage	-	-	5.698.789
Anpassung Eisenbahn-/Straßenüberführungen (EÜ/SÜ) & Bahnübergänge (BÜ) (s.u.)	-	-	310.800
Erdungs- & Rückleitungsanlagen Gleis	9,8 km	23.039 €/km	214.265
Anpassung Erdungskonzept der Bahnsteige an Haltepunkten & Bahnhöfen → 4 Bstg. Zwiesel, 1 Bstg. in Bettmannsäge	5 Bstg.	16.099 €/Bstg.	80.497
Umrichteranlage für 10 MW (Standardgröße bleibt gleich bei 8 MW → Ausgangsstudie 10 MW) + 2 Mio. € für zusätzliche Trafo- & Schaltanlage in Bestands-Umspannwerk 110/20 kV	-	-	6.937.162
Umrichtergebäude & Baustelleneinrichtung	-	-	241.492
Baukostenzuschuss/ Netzanschluss Bayernwerk (Leistung: 8 MW → Ausgangsstudie 10 MW)	-	-	778.080
doppeltes Mittelspannungskabel zur Anbindung Oberleitung und Rückleitung → Vorzugsvariante mit Anbindung am Klärwerk Zwiesel	4,7 km	172.795 €/km	812.135
Summe Energieversorgung	-	-	8.768.868
Planungsleistung (überschlägig ca. 20 %)	-	-	3.014.644

Anlage 28: RB 35/36/37 Oberleitungsinselfanlage Zwiesel – Bauwerke im Abschnitt Bettmannsäge – Zwiesel

Bauwerke im Abschnitt Bettmannsäge – Zwiesel	Maßnahme	Kosten in EUR
BÜ am Haltepunkt Bettmannsäge	Technische Anpassung an Beeinflussung durch Oberleitung	102.564
EÜ im Wald nahe Bettmannsäge (kurze EÜ)	Anpassung Erdung	102.564
EÜ Klärwerk Zwiesel (kurze EÜ)	Anpassung Erdung	102.564
EÜ Schwarzer Regen und Langdorfer Straße bei Bahn-km 119,2	Technische Anpassungen im Zuge der Masterrichtung, Kosten getrennt berücksichtigt (s.o.)	-

Anlage 29: RB 35 Elektrifizierung deutscher Teil Bahnhof Bayerisch Eisenstein

Elektrifizierung deutscher Teil Bahnhof Bayerisch Eisenstein	Anzahl	Kosten	Kosten [€]
Investitionskosten gesamt			1.920.356
Instandhaltungskosten pro Jahr	0,5 %		9.602
zu elektrifizierende Bahnhofsgleise	1,621 km	610.541 €/km	989.687
Weichenbespannungen (alle im Bahnhof Zwiesel)	4	53,665 €/Weiche	214.659
Summe Oberleitungsanlage	-	-	1.204.346
Erdungs- & Rückleitungsanlagen Gleis	1,621 km	23.039 €/km	37.347
Anpassung Erdungskonzept der Bahnsteige im Bahnhof	2 Bstg.	16.099 €/Bstg.	32.199
Mastschalter und Einbindung	-	-	35.000
Mittelspannungskabel zur Anbindung der Trenner in km	0,25	172.795 €/km	43.199
4x Trenner	-	-	40.000
Anteil kilometrisch (bezogen auf die Gesamtstrecke Klatovy – Bayerisch Eisenstein) am zu erwartenden neuen Unterwerk Dešenice	-	-	85.106
Summe Energieversorgung	-	-	203.305
Planungsleistung (überschlägig ca. 20 %)	-	-	443.159

<<Ende des Anlagenteils>>